

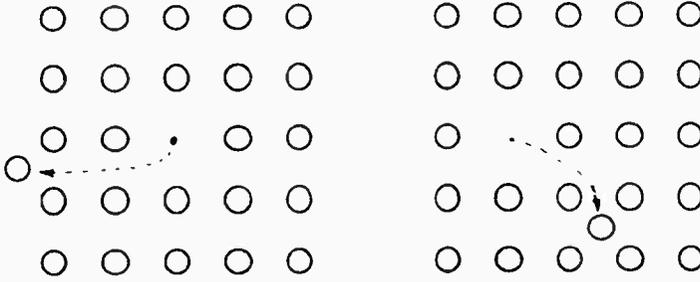
## الباب التاسع عشر

### Lattice Defects عيوب الشبكة

#### أولا : العيوب النقطية :

إذا تركت ذرة مكانها شاغرا في الشبكة تكون ما يسمى بالفراغه ( أو الشاغرة )

vacancy ( شكل ١٩ - ١ )



( شكل ١٩ - ١ )

وإذا انحسرت الذرة بين ذرات الشبكة سميت بالذرة البينية Interstitial atom

والعيوب النقطية في الشبكة نوعان إما زوج فرنكل Frenkel pair أو شاغرة شوتكي

Schottky كما مبين بشكل ( ١٩ - ١ ) .

#### ١٩ - ١ الاتزان الحرارى لعدد الشواغر في الشبكة :

: Equilibrium concentration of vacancies

توجد دائما الشواغر بأعداد كبيرة في البلورات في حالة اتزان ديناميكي حراري ،

ويزداد العدد كثيرا كلما ارتفعت درجة الحرارة .

لحساب عدد الشواغر عند درجة حرارة  $T^{\circ}K$  في بلورة ما نفرض أن هناك عدد  $N$

موضع للذرات في البلورة في حالتها التامة . N atomic sites

نفرض أننا أدخلنا عدد n شواغر في هذه البلورة ، يتغير تبعا لذلك كل من الطاقة الداخلية والانتروپيا .

نحصل على وضع الاستقرار الحرارى بإيجاد الطاقة الحرة F free energy ثم نوجد أقل قيمة لها . minimize the free energy

نفرض أن الطاقة المصاحبة لكل شاعرة هي  $\Delta E$  ، وأن الزيادة في الانتروپيا نتيجة لإدخالها في الشبكة هو  $\Delta S$  .

عندما نمزج عدد n شواغر بعدد N ذرات في الشبكة فإن عدد الطرق الممكنة لهذا التوزيع هو :

$$\frac{N!}{(N-n)!n!}$$

ويكون احتمال الحصول على أى توزيع من هذه التوزيعات هو أنتروپيا التركيب Configurational entropy أو أنتروپيا المزج ويساوى :

$$p = k \log_e \frac{N!}{(N-n)!n!}$$

إذا كان تركيز الشواغر في الشبكة هو :

$$C = \frac{n}{N}$$

وباستخدام تقريب ستيرلنج

$$\log N! = N \log N - N$$

نحصل على أنتروپيا المزج

$$p = N [ c \log c - (1-c) \log (1-c) ]$$

الزيادة في الانتروپيا الذاتية intrinsic entropy نتيجة لإدخال عدد n شواغر هو

$\Delta S$

∴ التغير الكلى في الانتروپيا بإدخال n شواغر هو :

$$n \Delta S - N k ( c \log c - \overline{1-c} \log \overline{1-c} )$$

$$F = U - T S$$

لكن الطاقة الحرة :

∴ التغيير فى الطاقة الحرة للبلورة ، ويساوى الطاقة الحرة للشواغر

$$= N \Delta E - T \left[ n \Delta S - Nk (c \log c - \overline{1-c} \log \overline{1-c}) \right]$$

بمفاضلة المقدار السابق بالنسبة لعدد الشواغر n ، ثم بمساواة الناتج بالصفر نحصل

على وضع الاتزان الحرارى

$$\therefore \Delta E - T \Delta S + Tk \log \frac{c}{1-c} = 0$$

$$\frac{c}{1-c} = \exp - \left( \frac{\Delta E - T \Delta S}{kT} \right)$$

$$1 = 1 - c \therefore$$

إذا كانت C صغيرة

$$\therefore C = \exp \frac{\Delta S}{k} \cdot \exp \frac{-\Delta E}{kT}$$

تعطى المعادلة السابقة عدد الشواغر فى حالة الاتزان الحرارى بدلالة طاقة التكوين

$\Delta E$  لشاغرة الواحدة ، والتي تكتب على الصورة  $E_f$

## ١٩ - ٢ حساب قيمة $e^{\Delta S/k}$

نستخدم قوانين الديناميكا الحرارية .

التغير فى الأنتروبيا لمجموعة هو

$$\begin{aligned} \Delta S &= \int_0^T \frac{C_v}{T} dT \\ &= \int_0^T \frac{1}{T} \left( \frac{dE}{dT} \right) dT = \frac{E}{T} + \int_0^T \frac{E}{T^2} dT \end{aligned}$$

باستخدام نظرية أينشتين للطاقة الذرية فى المادة

$$E = 3 kT \frac{x}{e^x - 1}$$

$$x = \frac{h \nu}{kT} \quad \text{حيث}$$

$\nu$  هو التردد الذرى نحصل على :

$$\frac{\Delta S}{3k} = \frac{x}{e^x - 1} + x - \log(e^x - 1)$$

عندما تكون  $x \ll 1$  يمكن تقريب المعادلة السابقة لتصبح

$$\frac{\Delta S}{3k} = -\log x = -\log \frac{h\nu}{kT}$$

$$\therefore \Delta S = -3k \log h\nu / kT$$

لتطبيق ما سبق على حالة شاغرة نفرض أن هناك عدد  $p$  جيران لها ، ولذلك نسقط العدد 3 من المعادلة السابقة والذي يدل أصلا على الثلاث درجات الحرارةية  $x, y, z$  ونستبدل هذا العدد بالمقدار  $p$  وهو عدد التناسق .

أيضا عند إدخال شاغرة فى الشبكة نجد أن التردد الذرى للذرات المحيطة بها يتغير من  $\nu$  إلى  $\nu'$  وبذلك يتغير الأنتروبيا بالمقدار

$$-pk \log \frac{h\nu'}{kT} - \left( -pk \log \frac{h\nu}{kT} \right) = -pk \log \frac{\nu}{\nu'}$$

ولكن تبعا لنظرية الحرارة الذرية يمكن تعريف ثابت جرونيزن

Gurneisen's constant

$$\gamma = -\frac{d \log \nu}{d \log V} = \frac{3V\alpha}{C_V K_T}$$

حيث  $V$  هو الحجم الذرى (atomic volume)

$\infty$  معامل التمدد الطولى

$K_T$  معامل الانضغاط الأيسوثرمالى ( ثابت الدرجة )

يصبح بذلك التغير فى الأنتروبيا نتيجة إدخال الشاغرة هو :

$$\Delta S = pk \log \frac{\nu}{\nu'} = pk \int_{\nu}^{\nu'} -\frac{d\nu}{\nu}$$

$$= -pk \frac{\delta v}{v}$$

لكن من ثابت جرونيزن

$$\gamma = - \frac{\delta v / v}{\delta V / V} = - \frac{V}{v} \cdot \frac{\delta v}{\delta V}$$

وبالتعويض

$$\therefore - \frac{\delta v}{v} = \gamma \frac{\delta V}{V}$$

$$\therefore \Delta S = pk \gamma \frac{\delta V}{V}$$

عند إدخال الشاغرة يتغير الحجم النسبي محليا بالمقدار :

$$\frac{1}{p} = \frac{p+1}{p} - 1 = 1 - \frac{\text{عدد الذرات قبل إدخالها}}{\text{عدد الذرات بعدها}}$$

$$\therefore \frac{\delta V}{V} = \frac{1}{p}$$

$$\Delta S = pk \gamma \cdot \frac{1}{p} = k \gamma$$

ويصبح بذلك عدد الشواغر التي تتزن حراريا عند درجة  $T^\circ K$  هي

$$C = e^\gamma \cdot e^{-E_f/kT}$$

وبالنسبة للمواد المعتادة نجد أن ثابت جرونيزن

$$e^\gamma = 1 ; \quad \gamma = 0.5$$

ليصبح تركيز الشواغر عند الاتزان هو :

$$C = \exp - (E_f/kT)$$

فإذا علمنا أن طاقة التكوين  $E_f$  للشاغرة تساوي حوالى ١ إلكترون فولت للمواد

المعتادة كالتحاسب ، نجد أن تركيز الشواغر عند درجة ١٠٠٠ كلفن تقريبا أى بالقرب من

نقطة الانصهار يصبح  $10^{-4}$  تقريبا .

## ١٩ - ٣ تعيين طاقة التكوين $E_f$ للشواغر عمليا :

نختار عادة أحد القياسات الفيزيائية الحساسة للتغيرات التركيبية الداخلية Structure sensitive physical property P عند التبريد السريع لبلورة ما من درجة حرارة مرتفعة إلى أخرى منخفضة يتجمد بداخلها عدد كبير من الشواغر التي كانت في حالة اتزان ديناميكي حراري عند الدرجة المرتفعة ، وتتأثر تبعاً لذلك الخاصية الفيزيائية تحت الاختبار ، فإذا فرضنا أن التغير الناتج في هذه الخاصية يرتبط مباشرة بعدد الشواغر المجمدة في الشبكة نتيجة التبريد الفجائي Quenching فإن :

$$\Delta P = A \exp - E_f / kT$$

وبالتالي بدراسة تغير P مع درجة الحرارة T K ، ورسم العلاقة بين  $\ln \Delta P$  مع

$$\left( \frac{1}{T} \right) \text{ نحصل على خط مستقيم يعطى ميله المقدار } ( E_f / k )$$

ويؤخذ عادة تغير المقاومة الكهربائية مع عدد الشواغر إذ أنها حساسة لذلك . كما يمكن قياسها بدقة كبيرة في درجات الحرارة المختلفة .

## ١٩ - ٤ تأثير الشواغر على الحرارة الذرية :

إذا كانت طاقة تكوين الشاغرة هو  $E_f$  تكون كمية الطاقة التي تكتسبها البلورة بإدخال

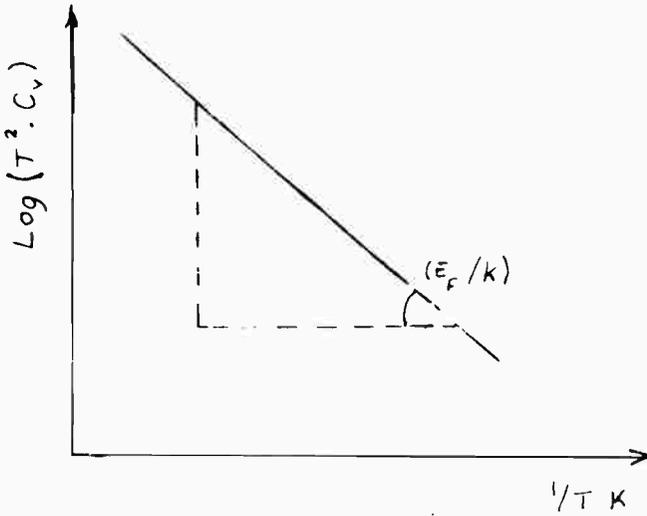
شاغرة واحدة هي :

$$E_f \exp ( - E_f / k T )$$

بمفاضلة المقدار السابق بالنسبة لدرجة الحرارة نحصل على الحرارة الذرية الإضافية

نتيجة لإدخال الشاغرة .

$$\therefore C_v = \frac{E_f^2}{kT^2} \exp ( - E_f / kT )$$



شكل (١٩-٢)

بإدخال عدد معقول من الشواغر في الشبكة ، ثم بقياس تغير الحرارة الذرية ، و رسم  $\log (T^2 \cdot C_v)$  مع  $1/T$  نحصل على خط مستقيم ميله  $E_f / k$  كما في شكل (١٩-٢).

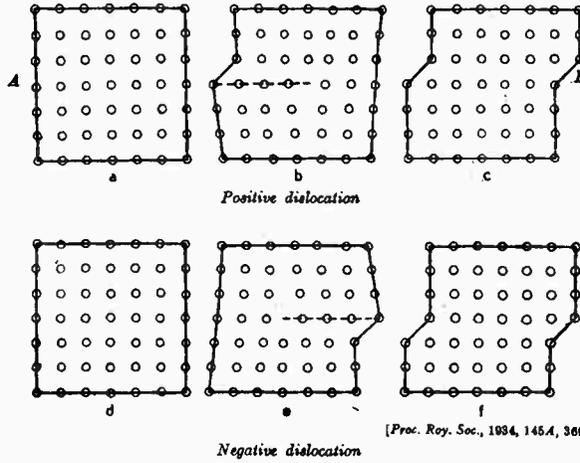
## ثانيا : العيوب الخطية Dislocation

### ١٩ - ٥ مقدمة :

إذا أثرتنا بقوة ما ، شادة أو قاصة ، علي جسم ما فإنه يتشوه بانفعال مرن أو غير مرن حسب شدة القوة المؤثرة . يعود الجسم بعد الانفعال المرن الى ما كان عليه شكلا وحجما بعد إزالة القوة ، وإذا زادت القوة عن الحد المرن يحدث بالجسم انفعال دائم ، ينشأ عن انزلاق المستويات الذرية على بعضها البعض ، وتبدأ هذه العملية إذا وصل الإجهاد إلى قيمة تميز المادة وتسمى إجهاد القص الحرج  $\sigma_c$  critical shear stress .

يمكن تصور تشوه البلورات إذا اعتبرنا أن مرونة الجسم تعود إلى القوى البينية بين الذرات ، والتي تعمل على أن تحتفظ كل ذرة بمكانها في نقطة شبكية ، كما تحفظ للشبكية ترتيبا معيناً في لوحة الخلية تتكرر في كل مكان بالبلورة ، فإذا اثرتنا بقوة قاصة على

بلورة تزاح الذرات من مواضع اتزانها بقدر صغير إذا كانت القوة صغيرة وتعود الذرات ثانية إلى نفس مواضعها إذا أزيلت القوة وهذه هي خاصية المرونة ، أما إذا أزدادت القوة تكون الإزاحة كبيرة ، ولكن تنتقل إلى مواضع اتزان أخرى ، ويقال عندئذ إنه حدث انزلاق بلورى " slip " وتكون البلورة قد عدت حدها المرن ، ويبقى انفعال دائم بها بعد إزالة القوة ويبين شكل ( ١٩ - ٣ ) كيف يحدث الإنزلاق .



شكل ( ١٩ - ٣ )

إذا حدثت وحدة انزلاق بالبلورة تصبح فى حالة تامة كما كانت سابقا إذ يظل عدد التناسق لكل ذرة كما كان قبل الإنزلاق ، أما إذا حدث إنزلاق جزئى بحيث يختلف عدد التناسق لبعض الذرات عما كان يقال : إن انخلاما dislocation قد حدث وإن البلورة قد تشوهت بحدوث عيوب فى شبكتها .

## ١٩ - ٦ الدليل العملى لوجود عيوب بالشبيكة البلورية :

### (١) كشف العيوب البلورية بالأشعة السينية rocking curve

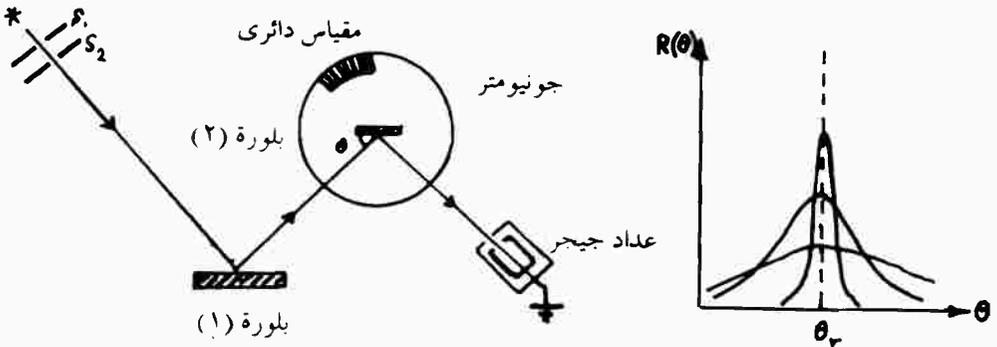
قدم حيود الأشعة السينية على بلورات المواد أول دليل عملى على وجود عيوب بالشبيكة ، فقد وجد اختلاف كبير فى شدة الأشعة السينية المنعكسة على مستويات بلورية معينة عندما توجد بالحساب أو بالقياس ، والتجربة المستخدمة لدراسة درجة الكمال degree

of perfection لمستويات ذرية معينة في البلورة تتركب من مصدر S للأشعة السينية يوضع أمامه حائلان بكل منهما شق ضيق يسمحان بخروج شعاع ضيق من الأشعة السينية التي تسقط على بلورة أحادية طول الموجة  $\lambda$  وفقا لقانون براج ، وتستخدم هذه الأشعة لدراسة المستويات الذرية ببلورة ثانية مثبتة على جونيرمتر ، ويمكن إدارة البلورة بزوايا صغيرة .

إذا سقطت هذه الأشعة بزواوية مماسية  $\theta$  على مجموعة مستويات  $(hk\ell)$  في البلورة البعد العمودي بينها  $d(hk\ell)$  يحدث انعكاس إذا تحقق قانون براج

$$2 d(hk\ell) \sin \theta = n \lambda$$

فإذا ما قيست شدة الأشعة المنعكسة  $R(\theta)$  بدلالة الزاوية  $\theta$  حول زاوية براج  $\theta_r$  نحصل على منحنى كالمبين بشكل ( ١٩ - ٤ ) ، وقد وجد عمليا أنه كلما اقتربت البلورة من الحالة المثالية أو التامة كلما كان اتساع المنحنى صغيرا . أما إذا أخذنا بعض التشوه اللدن بالبلورة يحدث اتساع أكبر للمنحنى مما يدل على عدم انتظام المستوى كما كان في حالته المثالية .

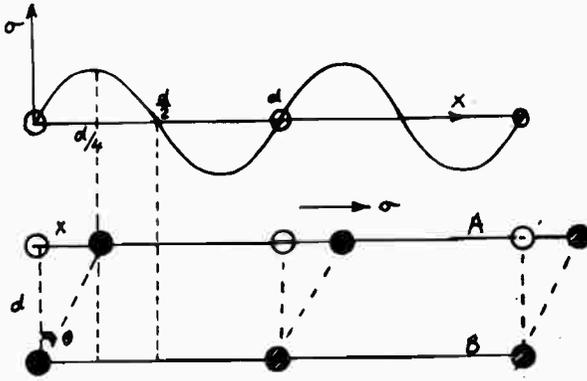


شكل ( ٤ - ١٩ )

٢ - اختلاف الخواص الميكانيكية لنفس المادة في حالاتها المختلفة :

أما الدليل الثاني فيمكن في الخواص الميكانيكية للجوامد ، فقد وجد أن قوة البلورات

الحقيقية أضعف آلاف المرات عن قيمتها المحسوبة بالنظرية الكلاسيكية للمرونة ، فإذا



شكل (١٩ - ٥)

اعتبرنا مستويين ذريين A , B ، المسافة العمودية بينهما d كما فى شكل (١٩ - ٥) وأثرنا عليهما بقوة قاصة  $\sigma$  ، ينزلق المستوى A على B عندما يصل  $\sigma$  إلى قيمته الحرجة  $\sigma_C$  وعندئذ تكون ذرات A قد أزيحت من مواقع اتزانها بمقدار  $(d/4)$  ، ويلاحظ أنه عند  $\frac{d}{2}$  تصير القوة القاصة

صفيرية القيمة حيث تتغير القوة

القاصة بشكل دورى بين نقط الشبيكة ويكون عندها طاقة الموضع أقل ما يمكن ، أى أن انتقال الذرة إلى موضع يبعد  $\frac{d}{4}$  من موضع اتزانها يجعلها تنزلق بعد ذلك تلقائياً ، ولا تعود ثانية إلى وضعها الأول وتسمى هذه النقطة بنقطة الإذعان yield point وبالحساب التقريبي نجد أن  $\sigma_C = \frac{G}{4}$  باعتبار أن انفعال القص  $\theta = (x/d)$  وقيمته عند نقطة الإذعان هى  $\frac{1}{4}$  . أى أن إجهاد القص الحرج يساوى تقريباً  $\frac{1}{4}$  معامل القص للمرونة

وقيمته للمواد المعتادة بين  $10^{-1}$  و  $10^{-2}$  دالين / سم<sup>٢</sup> .

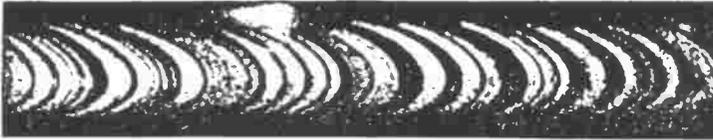
والآن إذا نظرنا للقيم المقاسة للنسبة بين  $\sigma_C$  و G لنفس المادة فى حالاتها المختلفة نجد تبايناً كبيراً كما هو مبين بالجدول لمادة الألومنيوم . ويعود الاختلاف الكبير فى القيمة  $G / \sigma_C$  للألومنيوم فى أشكاله المختلفة لأثر عيوب الشبيكة على الخواص الميكانيكية للمادة .

المادة	معامل القص G	إجهاد القص الحد $\sigma_c$	$G / \sigma_c$
بلورة أحادية من ألومنيوم	$2.5 \times 10^{11}$	$4 \times 10^4$	60,000
ألومنيوم متعدد الحبيبات	$2.5 \times 10^{11}$	$2.6 \times 10^8$	900
ألومنيوم تجارى	$\sim 2.5 \times 10^{11}$	$9.9 \times 10^8$	250
دور ألومين	$\sim 2.5 \times 10^{11}$	$3.6 \times 10^9$	70

### ٢ - الخواص الاتجاهية للتدفق اللدن : Anisotropy of plastic flow

لقد وجد أن عملية الانزلاق فى البلورات الأحادية تتم دائما على مستويات أكثر رص للذرات فى الشبيكة كما أن اتجاه الانزلاق يكون فى اتجاه أكثر رص للذرات ، ففى حالة الشبيكة التكعيبية متمركزة الوجه . f . c . c . يكون مستوى الانزلاق هو : (111) واتجاه الانزلاق هو :  $\langle 110 \rangle$  بينما يكون هذا المستوى فى الشبيكة التكعيبية متمركزة الجسم . c . c . b هو : (110) ويكون اتجاه الانزلاق  $\langle 111 \rangle$  وبين شكل (١٩-٦) مستوى الانزلاق واتجاهه فى الشبيكة . f . c . c . وكذلك مناطق الانزلاق كما تظهر تحت الميكروسكوب الميتالوجرافى لبلورة أحادية

#### PROBLEM OF PLASTIC DEFORMATION



*Cadmium crystal extended at 250° C*



*[From "Kristallplastizität," Boas and Schmid*

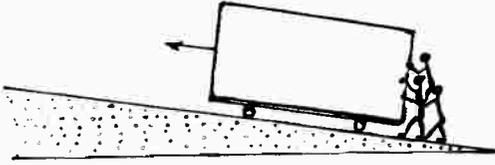
*Zinc crystal extended at 300° C*

شكل (١٩-٦)

ولتفسير حدوث انزلاق كبير على مستويات ذرية معينة دون غيرها كما تظهرها مناطق

الانزلاق ، يفترض وجود عيوب شبيكة على هذه المستويات تسهل انزلاق جزء من البلورة

على جزئها الآخر وتشبه هذه العملية ما فعله قدماء المصريين شكله (٧ - ١٩) عند بناء الأهرامات فقد كان نقل الأحجار الثقيلة يتم بطريقة الانزلاق على مستويات مائلة يوضع عليها عصى رفيعة تسهل رفع الأحجار الثقيلة بقوة بشرية صغيرة ، شكل (٧-١٩).

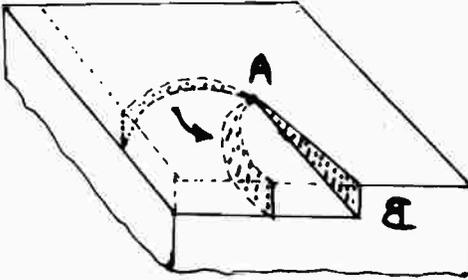


شكل (٧ - ١٩)

#### ٤ - معدل النمو البلورى :

لوحظ من زمن بعيد أن معدل نمو البلورات أكبر كثيراً من المعدلات المحسوبة باعتبار البلورات التامة ، وأنه كلما كان هناك عيوباً بالمستوى الذى تنمو عليه البلورة كلما ازداد معدل النمو فى هذا الاتجاه ، وفى عام ١٩٤٩م فسر فرانك هذا النمو الشاذ للبلورات بوجود حافة AB على السطح الخارجى للبلورة ( كما فى شكل (٨ - ١٩) ) أوجدها عيب بلورى ،

فى داخل البلورة ، وتنمو البلورة بدوران هذه الحافة عندما تترسب عليها الذرات من المحلول، وكل دورة كاملة من الحافة يرتفع سطح البلورة بمقدار مستوى ذرى وتعود الحافة إلى ما كانت عليه سابقاً وباستمرار دوران الحافة مع نمو البلورة يتكون ما يسمى ببلورة النمو الحلزونى .

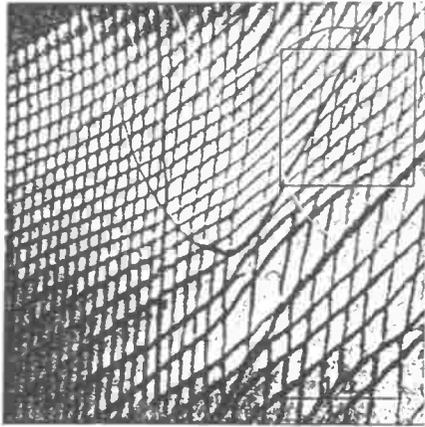
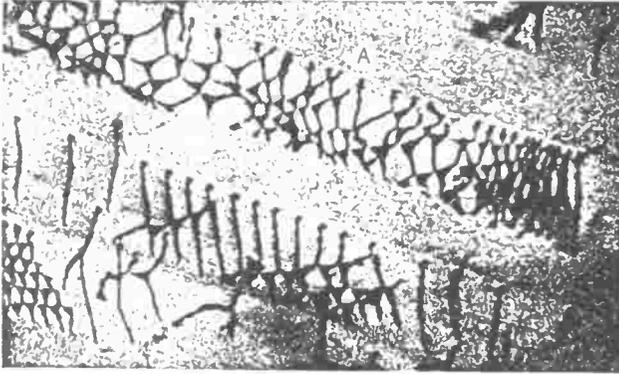


شكل (٨ - ١٩)

Helical growth spiral

## ٥ - إظهار عيوب الشبكة ميكروسكوبيا :

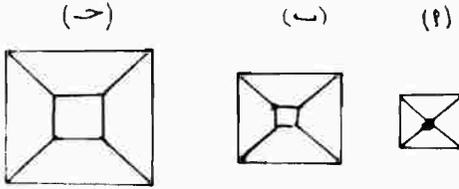
بعد اكتشاف قدرة الميكروسكوب الإلكتروني النفاذ Transmission electron microscope على كشف وتصوير التجمعات الذرية داخل البلورات، ظهرت في صور هذا الميكروسكوب خطوطا سوداء لها أشكال معينة ، وقد فسرت هذه الخطوط بوجود عيوب شبكية طولية ، يختلف عندها معامل الاستطارة الذرى للألكترونات عنه في المناطق الخالية من العيوب ، وعلى ذلك فإن زيادة استطارة الألكترونات عند هذه العيوب تظهر خطوطا سوداء كما في شكل ( ١٩ - ٩ )



شكل ( ١٩ - ٩ )

## ٦ - ظهور نهايات الانخلاعات على السطوح الخارجية للبلورات :

عند معالجة السطح الخارجى للبلورة بمحلول مخفف من حامض، يهاجم الحامض الأجزاء الضعيفة من البلورة ، وهى الأجزاء المحيطة بنهايات الانخلاعات حيث يوجد العيوب فى ترتيب الذرات وينشأ عن ذلك ما يسمى بحفرة التاكل Etch pit وشكلها هرمى رأسه



حفر التاكل

داخل البلورة كما هو مبين بشكل ( ١٩ -

١٠ ) وإذا أثرنا بقوة تحرك الانخلاع من

موضعه ، ثم إذا أعيد معالجة السطح

بالحامض يأخذ الشكل الهرمى لحفرة

التاكل الشكلين ب ، ج حيث تتاكل القمة

الهرمية تاركة شكلا مسطحا .

شكل (١٩ - ١٠)

## ١٨ - ٧ أنواع العيوب الخطية للشبيكة - الانخلاعات :

العيوب الأساسية فى الشبيكة البلورية نوعان :

١ - عيوب نقطية ، وتشمل : الفراغات والذرات البينية والشوائب ، ويمكن بتجميع مثل هذه

العيوب ظهور عيوب سطحية أو حجمية كما يحدث فى عملية الترسيب فى المحاليل

الصلبة .

٢ - عيوب خطية ، وتسمى بالانخلاعات وهى نوعان : انخلاع حدى وانخلاع قص .

ويمكن أيضا وجود سطوح معيبة داخل البلورة نتيجة تجميع عدد من الانخلاعات على

مستوى معين كما هو الحال فى الأجسام متعددة الحبيبات poly crystalline . فكل حبيبة

هى بلورة احادية صغيرة ولكن يختلف اتجاه مستوياتها الذرية عن اتجاه مستويات الحبيبة

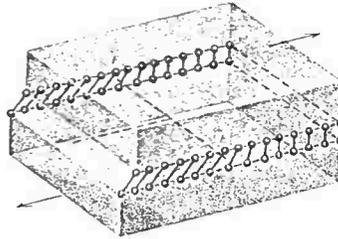
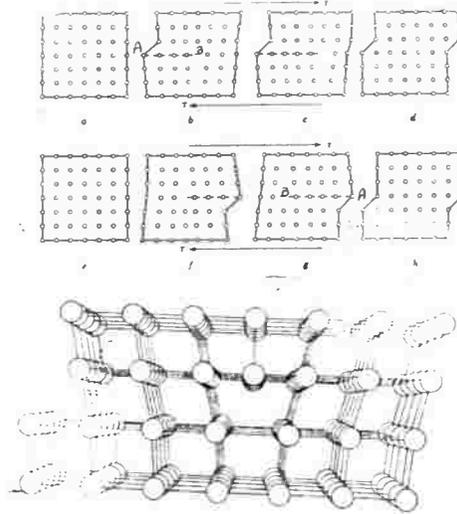
المجاورة ، ويعتبر السطح الفاصل بينهما ، ويسمى بالحد الحبيبي ، grain boundary

يعتبر مكونا من عدد من الانخلاعات تترتب فى بعدين .

سنركز كلامنا فى هذا الجزء على العيوب الخطية وهى الانخلاعات .

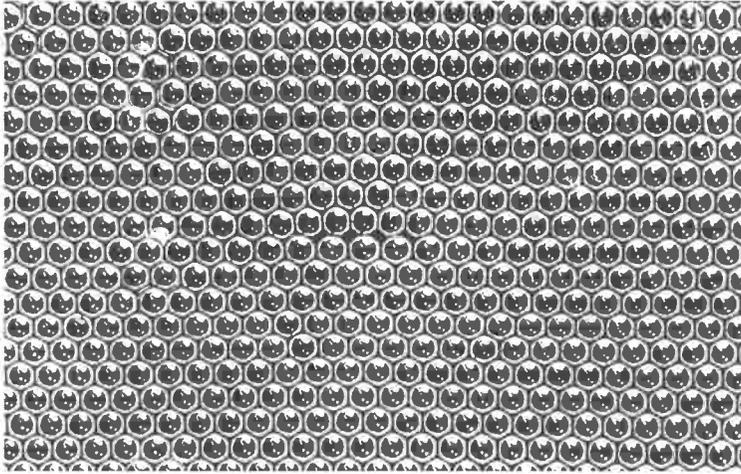
## ١٨- ٨ الانخلاع الحدى :

اكتشف تيلور وأروان ( Taylor and Orowan ) عام ١٩٣٤ م الانخلاع الحدى ، ويتركب من خط فى البلورة ينقص عدد التناسق لجميع الذرات عليه بمقدار الواحد الصحيح عنه فى الأجزاء السليمة من البلورة ، ولكى نتصور كيف يتكون الانخلاع الحدى نعتبر بلورة تامة بلا عيوب ، ونؤثر عليها بإجهاد  $\sigma$  . ونفرض أن AB يمثل مستوى انزلاق بالبلورة (شكل ١٩ - ١١) . يحدث انزلاق كامل على المستوى على مرحلتين : يحدث أولا انزلاق جزئى ينحشر فيه مستوى ذرى أو أكثر بين المستويات الأخرى مكونا انخلاعا حديا . فإذا استمر الانزلاق حتى يخرج الانخلاع من الجهة الأخرى للبلورة تعود البلورة لحالتها التامة بلا عيوب ، ولكن يظهر على سطحها سلمتين كما هو مبين بشكل ( ١٩ - ١١ ) .



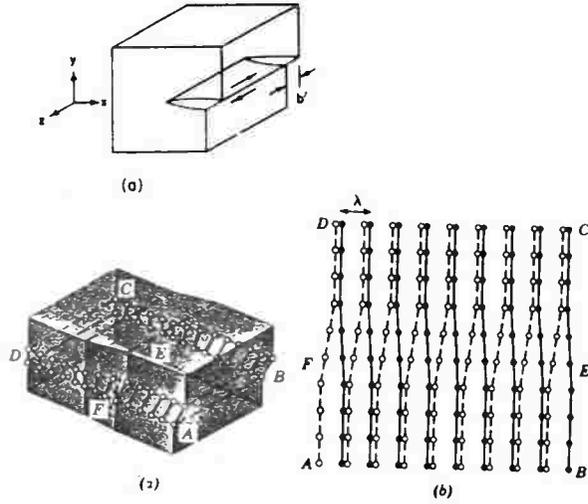
شكل ( ١٩ - ١١ )

يتكون الانخلاع الحدى بالانزلاق الجزئى حيث يتكون خط عمودى على مستوى الورقة وعلى متجه الانزلاق تكون جميع الذرات عليه أقل بمقدار الواحد الصحيح فى عدد تناسقها مع جيرانها ، ويتحرك هذا الخط على مستوى الانزلاق AB . وتبين الصورة بشكل (١٩-١٢) مستوى ذريا به انخلاع حدى ، ولكى تراه واضحا انظر مماسيا للورقة .



## ١٨ - ٩ انخلاع القص :

بعد اكتشاف الانخلاع الحدى بأعوام قليلة وضع برجر Burger تصوره لانخلاع آخر سمي انخلاع القص يكون لذراته نفس عدد التناسق ، ولكن يتشوه الشكل الفراغى المكون من أقرب جيران ، ويحدث ذلك عند التأثير على البلورة بقوة قاصة تحدث فيها انزلاقا جزئيا كما هو مبين بشكل (١٩ - ١٣) .



شكل ( ١٩ - ١٣ )

ويلاحظ في حالة انخلاع القص أنه بالدوران حول خط الانخلاع AB نرتفع أو ننخفض بمقدار متجه الإزاحة  $b$  حسب اتجاه الدوران ، وليس لانخلاع القص أى مستوى انزلاق كما في الانخلاع الحدى ولذلك فيمكن له أن يتحرك فى أى اتجاه فى البلورة بينما لا يستطيع الانخلاع الحدى التحرك إلا فى مستوى انزلاقه .

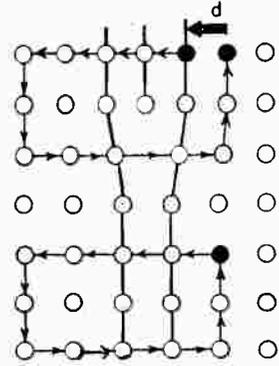
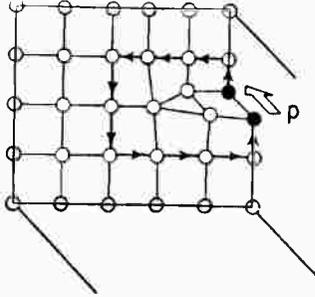
## ١٨ - ١٠ دائرة بورجر وشدة الانخلاع Dislocation strength :

يوصف الانخلاع عادة بمتجه يسمى متجه الإزاحة أو متجه بورجر Burger's vector . وللحصول على هذا المتجه نرسم حول الانخلاع دائرة بورجر وتتم بإجراء عدد متساو من الإزاحات الشبكية فى كل من الاتجاهات الأربعة : يسار - أسفل - يمين - أعلى كما هو مبين بشكل ( ١٩ - ١٤ ) فإذا كانت الشبيكة داخل دائرة بورجر تامة وليس بها عيوب انطبقت نقطة البداية فى الدائرة على نقطة النهاية ، أما إذا احتوت دائرة بورجر على انخلاع يكون المتجه  $b$  الذى يقفل الدائرة مميزا للانخلاع مقدارا واتجاها .

ويمكن التعبير عن دائرة بورجر رياضيا باعتبار أية نقطة فى الشبيكة ولتكن  $u$  مثلا ثم نحدث إزاحات جانبية (s)  $\vec{u}$  حول منطقة ما لتكوين حلقة نهايتها  $u^1$  ينطبق طرفا الحلقة

إذا كانت الشبكة تامة أما إذا لم تقفل الدائرة فإن المتجه الذي يقفلها هو متجه بورجر

$$\underline{b} = \int_C \frac{\delta u}{\delta s} ds = u' - u$$



شكل (١٩ - ١٤)

## ١٨ - ١١ خواص الانخلاع:

يتميز الانخلاعات في الشبكة البلورية الصفات التالية:

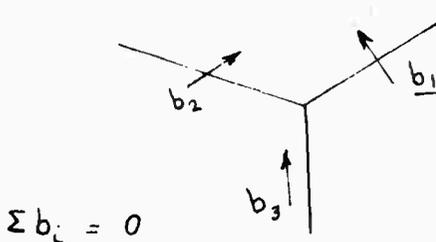
١ - لا يمكن لأي انخلاع أن ينتهي بطرف حر ومطلق في الشبكة ، فإما أن يقفل على نفسه مكونا خية loop أو ينتهي طرفاه عند سطح حر داخلي أو خارجي في البلورة .

٢ - يمكن تكون نظام شبكي من الانخلاعات في البلورة ، فعندما يتقابل انخلاعين أو يتقاطعا تتكون عقده node تصبح نقطة تثبيت للانخلاع في الشبكة ، وينطبق قانون

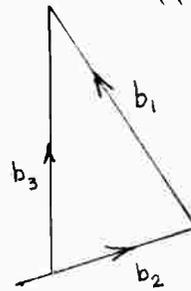
$$\sum_i b_i = 0$$

البقاء على متجهات بورجر للانخلاعات المتقابلة في نقطة حيث يكون

ويشبه هذا القانون قانون كيرشوف في الكهربية للتيارات المتقابلة في نقطة ( انظر شكل ١٩ - ١٥ ).



شكل (١٩ - ١٥)



٢ - كثافة الانخلاع فى بلورة تعرف بالطول الكلى للانخلاع فى وحدة الحجم أى أن

$$\rho = L/V$$

٤ - الطاقة الحرة للانخلاع دائماً موجبة ولا يوجد أبداً الإنخلاع فى حالة اتزان حرارى .

٥ - أى قوة مؤثرة على بلورة تعطى انخلاعات حدية أو قص أو الاثنين معا على شكل انخلاع عام له مركبه حدية وأخرى قص ، ولا يعتمد ذلك على سطح البلورة .

٦ - أى إجهادات داخلية فى البلورة يمكن تحليلها وترجييعها لوجود انخلاعات صغيرة .

٧ - التعريف بالانخلاع يتم بتحديد مقدار متجه بورجر واتجاهه ويكتب هكذا  $[hk\ell]$  حيث  $b$  هو مقدار متجه بورجر،  $[hk\ell]$  اتجاهه ، أما لماذا يكتب مربع  $b$  فسنعرف فيما بعد أن طاقة الانخلاع تتناسب مع مربع متجه بورجر فمثلاً فى بلورة f.c.c.

يكون مستوى الانزلاق هو (111) واتجاه الانزلاق

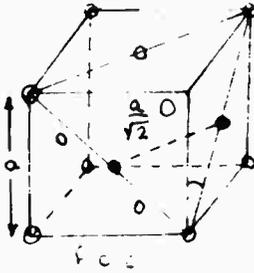
$[110]$  والمسافة بين ذرتين متجاورتين على هذا

المستوى هى  $\frac{a}{\sqrt{2}}$  وعلى ذلك يعرف انخلاع

الوحدة unit - dislocation فى البنية f . c . c.

بالرمز  $[110]$  مع اعتبار البعد الشبكي  $a$

يساوى الوحدة . شكل (١٩ - ١٦)



شكل (١٩ - ١٦)

١٨ - ١٢ طاقة الانفعال حول الانخلاع Strain energy of a dislocation :

اعتبر وسطاً مرناً غير متجه الخواص isotropic به انخلاع قص . يكون متجه الإزاحة

$\bar{u}$  لكل نقطة فى فراغ البلورة موازياً لخط الانخلاع ؛ لحساب طاقة الانفعال حول

الانخلاع نوجد الشغل المبذول فى إزاحة كل ذرة من موضع اتزانها الأصلي إلى موضعها

بعد الانخلاع ، يكون مجموع هذا الشغل لكل ذرات الوسط المحيط بالانخلاع هو طاقة

الانفعال للانخلاع .

يجب أن تتوفر هنا ثلاثة شروط تمليها نظرية المرونة للأجسام

١ - أن يكون الجسم كله فى حالة اتزان ، ويستوفى هذا الشرط إذا كان :

$$(1 - 2 \nu) \Delta \bar{u} + \text{grad div } \bar{u} = 0$$

حيث  $\nu$  هى نسبة بواسون .

٢ - إذا عملنا دائرة بورجر  $S$  حول الانخلاع فإن المتجه الذى يقفلها يكون متجه بورجر  $\underline{b}$  حيث

$$\int_C \frac{\delta u}{\delta s} d S = \bar{u}_{M'} - \bar{u}_M = \underline{b}$$

٣ - ألا يكون هناك أى إجهادات على سطح البلورة أى أن

$$\sigma_{\text{surface}} = 0$$

وحل هذه المعادلات حلا رياضيا سليما ليس أمرا سهلا ، ولكننا نكتفى بالطريقة

التقريبية التالية التى تعطينا نتائج مرضية تماما .

## ١٨ - ١٣ مجال الانفعال حول انخلاع قص :

لا يوجد حول انخلاع قص أى ضغط هيدروستاتيكي كما هو الحال فى حالة الانخلاع

الحدى ، ويتناسب الانفعال عند أى نقطة تناسباً عكسياً مع بعد النقطة عن الانخلاع ، فإذا

كان  $\underline{b}$  هو متجه بورجر للانخلاع  $AB$  فى وسط غير متجه الخواص فإن انفعال القص،  $\varepsilon$  ،

على بعد  $r$  من الانخلاع يعطى بالمعادلة :

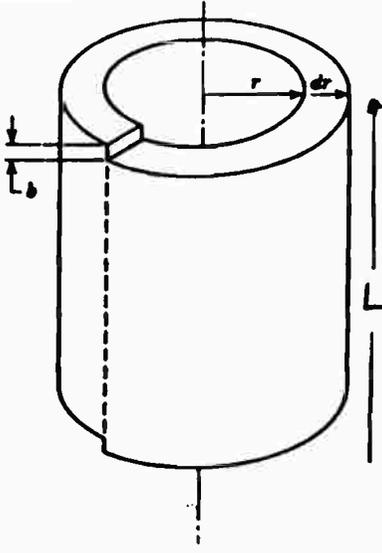
$$\varepsilon_r = \frac{b}{2 \pi r} \quad (\text{انظر شكل ( ١٧ - ١٩ )})$$

وبفرض إمكان تطبيق نظرية هوك لمرونة الأجسام يكون الإجهاد الداخلى عند نقطة

تبعد مسافة  $r$  من الانخلاع هو

$$\sigma_r = G \cdot \varepsilon_r = G b / 2 \pi r$$

حيث  $G$  معامل المرونة للقص . ويتناقص الإجهاد بمعدل يتناسب مع مقلوب البعد عن



شكل (١٧ - ١٩)

$$dE = \frac{1}{2} G \left( \frac{b}{2\pi r} \right)^2 \cdot dV$$

حيث  $dV$  هو حجم الشريحة ويساوى

$$dV = 2\pi r dr \cdot L$$

حيث  $L$  هو طول الانخلاع (وهو هنا طول الأسطوانة)

نجرى عملية تكامل لجميع الشرائح بين البعدين  $r_0$  و  $R$

حيث  $r_0$  هو لب الانخلاع dislocation core والذي لا يصح عنده تطبيق نظرية هوك

للمرونة ،  $R$  هو المدى داخل البلورة الذي يتوقف بعده تأثير الانخلاع الانفعالي .

طاقة انخلاع القص لكل وحدة طول هي

$$E = \int_{r_0}^R \frac{G b^2}{2\pi r} dr = \frac{G b^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0} / \text{cm} .$$

ويجب ألا نعبر  $r_0 = 0$  ، وإلا أصبحت قيمة  $E$  لا نهائية ونعتبر المادة داخل أسطوانة

نصف قطرها  $r_0$  (عادة تكون  $r_0$  أقل من  $2b$ ) هي لب الانخلاع ، ولتقدير طاقة الانفعال

داخلة نوجد الطاقة اللازمة لصهر هذا الجزء المعيب من البلورة ، فإذا كانت  $L_f$  هي الحرارة

الكامنة للانصهار لكل ذرة تكون طاقة انصهار اللب لكل سم هي

الانخلاع .

اعتبر أسطوانة في جسم البلورة محورها خط

الانخلاع ، نقسم الأسطوانة إلى شرائح أسطوانية

لها نفس المحور ونعتبر إحداها التي تقع على البعد

بين  $r$  و  $r + dr$

طاقة المرونة بالشريحة نتيجة للقص لوحدة

الحجوم هي :

$$\int \sigma d\epsilon = \int G \epsilon d\epsilon = \frac{1}{2} G \epsilon^2$$

وعلى ذلك تكون الطاقة المختزنة في الشريحة :

$$w^1 = \frac{\pi (2b)^2 \times l}{\Omega} \cdot L_f$$

حيث  $\Omega$  هو الحجم الذرى ،  $b$  هو متجه بورجر ،  
وعلى ذلك تكون طاقة انخلاع القص لكل وحدة طول هي

$$E = \frac{G b^2}{4 \pi} \ln \frac{R}{r_0} + \frac{4 b^2}{\Omega} \cdot L_f$$

وبالحساب نجد أن الحد الثانى من هذه المعادلة صغير القيمة جدا بالنسبة للحد الأول ،

وعلى ذلك يمكن إهماله بدون خطأ يذكر .

كما أنه يمكن تقريب الحد الأول باعتبار أن قيمة  $R$  عادة لا تزيد عن ١٠٠ سم أى

$10^{10}$  °A وان  $r_0 \simeq 2$  °A ، وعلى ذلك تقترب قيمة  $\ln \frac{R}{r_0}$  من القيمة  $4 \pi$  فى مقام الحد

الأول .

وعلى ذلك تصير المعادلة  $E \simeq G \cdot b^2$  هي معادلة طاقة الانخلاع ، ويمكن التحقق مع

إثبات أن هذه المعادلة تنطبق أيضا على طاقة الانخلاع الحدى تماما كما هي صالحة

لانخلاع القص .

ويمكن الحساب التقريبي لطاقة الانخلاع لكل سم كما يلى :

$$b \simeq 2 \times 10^{-8} \text{ cm} ; G \simeq 10^{11} ; 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ ergs}$$

$$\therefore E = G b^2 = \frac{10^{11} \times 4 \cdot 10^{-16}}{1.6 \times 10^{-12}} \simeq 2.5 \times 10^7 \text{ eV/cm}$$

قيمة هذه الطاقة كبيرة جدا بالنسبة لطاقة التهيج الحرارى  $k T$  والتي تساوى عند درجة

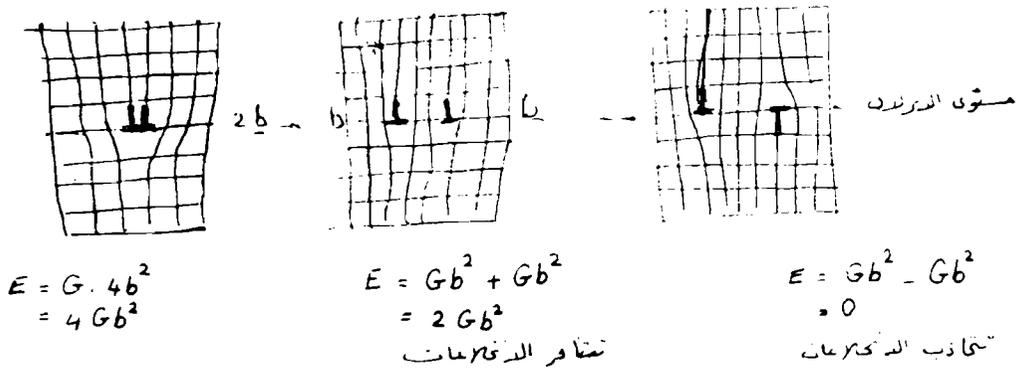
حرارة الغرفة حوالى  $2.6 \times 10^{-2} \text{ eV}$  ، وعلى ذلك لا يمكن لطاقة التهيج الحرارى تكوين

انخلاعات فى البلورة كما هو الحال فى حالة الفراغات التى توجد دائما فى حالة اتزان

ديناميكي حرارى فى البلورة :

## ١٨ - ١٥ نتائج مترتبة على كبر طاقة الانفعال للانخلاع :

أولا : نتيجة لأن طاقة الانخلاع متناسبة مع مربع متجه بورجر لذلك فإن انخلاعا متجه بورجر له  $2b$  تكون طاقته متناسبة مع  $4b^2$  بينما مجموع طاقتي انخلاعين منفردين متجه بورجر لكل منهما  $b$  هي  $b^2 + b^2$  أى  $2b^2$  فقط . واستنادا إلى قاعدة أقل طاقة حرة ، والتي تنص على وجوب أن تكون الطاقة الحرة لأى تفاعل أقل ما يمكن ، لذلك يتنافر كل انخلاعين لهما نفس الإشارة بينما يجذب كل انخلاعين إشارتهما مختلفة ، وشكل (١٨-١٩) يوضع التفاعل البيني للانخلاعات .



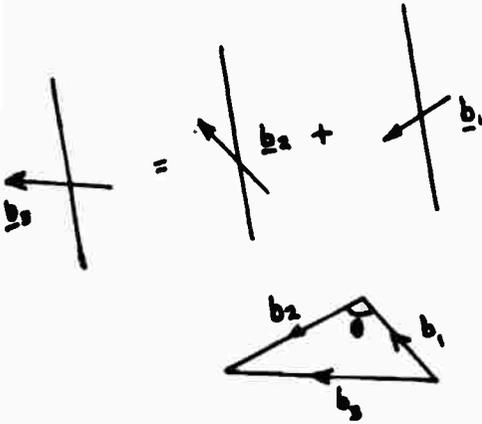
ثانيا : نتيجة أخرى لكبر طاقة الانخلاع لوحدة الأطوال ولكى تصير الطاقة الحرة للانخلاع أقل ما يمكن يعمل خط الانخلاع على أن يكون طوله أقصر ما يمكن دائما ، ويؤدى ذلك إلى ظهور شد دائم فى خط الانخلاع line tension كما هو الحال فى سلك مرن مشدود ، وتعطى هذه الصفة لخط الانخلاع إمكانية الإهتزاز فى مجال إجهاد متردد ، ويتبع ذلك ظهور أنتروبيا للحركة .

ثالثا : اتحاد الانخلاعات أو تفككها يتم وفقا للقاعدة الآتية :

نفرض انخلاعين متجه بورجر لهما  $b_1$  &  $b_2$  بينهما زاوية  $\theta$  شكل (١٩-١٩)

بتطبيق قاعدة جمع المتجهات يكون متجه بورجر المحصل لهما هو  $b_3$  حيث

$$b_3 = b_1 + b_2$$



أما عن طاقة الانخلاع المحصل فنحصل عليها من مربعات متجهات بورجر فتكون طاقة الانخلاع المحصل ( resultant ) مساوية

$$E = G ( b_1^2 + b_2^2 + 2 b_1 b_2 \cos \theta )$$

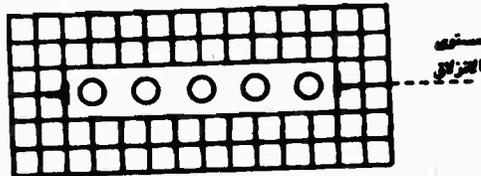
وهنا تظهر الحالات التالية :

١ - إذا كانت  $\theta = 0$  وأن  $b_1 = b_2 = b$  ، شكل ( ١٩ - ١٩ )

أى فى حالة انخلاعين متماثلين لهما نفس الاتجاه ، تساوى الطاقة المحصلة لهما  $4 b^2$  وهذه القيمة أكبر من مجموع طاقتى الانخلاعين وهم فرادى ، ولذلك يحدث تنافر بينهما حتى لا تزداد الطاقة الحرة فى البلورة .

٢ - إذا كانت  $\theta = 180$  نجد أن الطاقة المحصلة تساوى الصفر أى أن الطاقة الحرة تنقص ، ولذلك يحدث تجاذب بين الانخلاعين المتماثلين المختلفين الاتجاه مما يسبب تلاشيها تماما من البلورة .

وإذا لم يكن للانخلاعين نفس مستوى الانزلاق كما فى شكل ( ١٩ - ٢٠ ) يتلاشى الانخلاعين تاركين أما صفا من الفراغات أو صفا من الذرات البينية interstitial atoms .



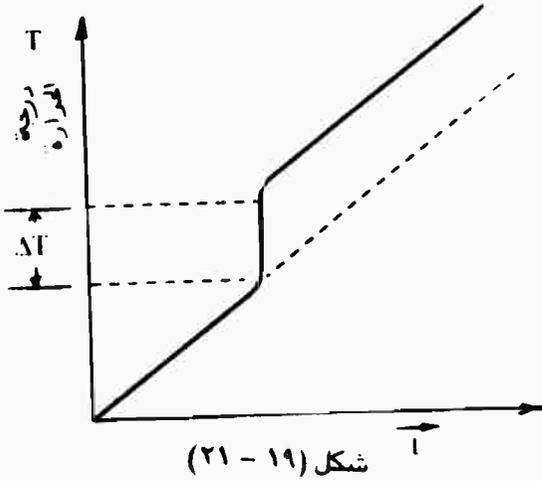
شكل ( ١٩ - ٢٠ )

## ١٨ - ١٦ تعيين طاقة الانخلاع عمليا :

يستخدم المسعر الايسوثرمالي في قياس كمية الطاقة المتحررة في بلورة مشوهة نتيجة لتخميرها في درجة حرارة مرتفعة حتى تتحرر كمية من الانخلاعات يمكن تحديد كثافتها بواسطة الميكروسكوب الالكتروني .

تسخين المسعر الايسوثرمالي يتم بمعدل ثابت حيث ترتفع درجة حرارته بمعدل ثابت ينتج عنه خط مستقيم في منحنى التغير بين درجة الحرارة والزمن (كما في شكل ( ١٩ - ٢٠ ) .

عند وضع بلورة مشوهة تشويهاً لنا في المسعر وإعادة التسخين نحصل على كتف في خط التسخين ينشأ عن تحرر عدد من الانخلاعات معطية طاقاتها للمسعر .



من الزيادة في درجة الحرارة  $\Delta T$  وبمعرفة كتلة البلورة  $m$  وحرارتها النوعية  $C$  تكون كمية الحرارة التي تحررت هي  $m \cdot c \cdot \Delta T$

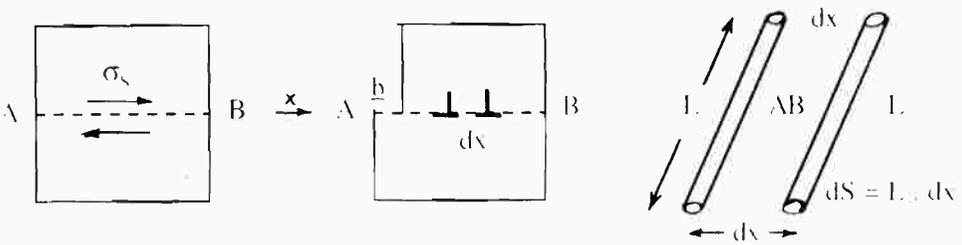
وباستخدام الميكروسكوب المنفذ يمكن قياس كثافة الانخلاعات قبل وبعد عملية التسخين في المسعر لمعرفة كمية الانخلاعات التي أزيلت بالتسخين . من ذلك نحصل على الطول الكلي للانخلاعات في وحدة الحجم والتي أزيلت خلال التجربة ، ومن معرفة كمية الطاقة التي تحررت يمكن إيجاد طاقة الانخلاع لوحدة الأطوال .  
وقد أثبتت التجربة مطابقة القيم المقاسة عمليا بالقيم المحسوبة نظريا .

## ١٨ - ١٧ تكاثر الانخلاعات Multiplication of dislocations :

تتكون الانخلاعات بتأثير إجهادات مرتفعة تزيد على إجهاد الإنعان للمادة ، كما يحدث عادة في حالة التشوه اللدن plastic deformation ولكن يحدث تكاثر للانخلاعات في

كثير من الحالات دون الحاجة لهذه الإجهادات المرتفعة . ويتم هذا التكاثر عن طريق إجهاد صغير ، يؤثر فى مستوى الانزلاق على الانخلاع بقوة تتسبب فى انزلاقه إذا كان حرا أو تقوسه إن كان مثبتا من طرفيه .

ولحساب القوة المؤثرة على الانخلاع لوحدة الأطوال نعتبر بلورة حيث  $AB$  هو مستوى انزلاق انخلاع حدى عليه كما هو مبين بشكل ( ١٩ - ٢٢ ) نتج عن التأثير على البلورة بإجهاد  $\sigma_s$  على مستوى الإنزلاق  $AB$  .



شكل ( ١٩ - ٢٢ )

إذا أزيح الانخلاع مسافة  $dx$  فإنه يكتسح مساحة  $dS$  على مستوى الانزلاق . وإذا

$$dS = L \cdot dx$$

كان طول الانخلاع  $L$  تكون هذه المساحة هي

القوة المؤثرة على الانخلاع لتحث الانزلاق مساحة  $dS$  بواسطة الإجهاد  $\sigma_s$  هي :

$$F_s = \sigma_s \cdot dS$$

وإذا كان  $b$  هو متجه بورجر فإن الشغل المبذول لهذه الإزاحة هو  $b \cdot ds$  .

ومن ناحية أخرى اذا كانت القوة المؤثرة على الانخلاع لوحدة الأطوال منه هي  $F_L$

فإن الشغل المبذول من القوة لإزاحة الانخلاع مسافة  $dx$  هو  $F_L \cdot dx$  ويكون الشغل الكلى

$$dW = F_L \cdot L \cdot dx$$

المبذول لطول  $L$  من الانخلاع هو

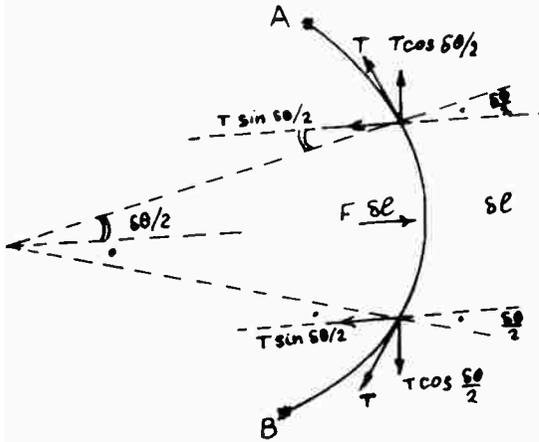
$$dW = \sigma_s \cdot dS \cdot b = F_L \cdot L \cdot dx$$

وبذلك يكون

ولكن  $dS = L \cdot dx$  وعلى ذلك يكون

$$F_L = \sigma \cdot b$$

أى أن القوة على وحدة الأطوال من الإنخلاع تساوى قيمة الإجهاد على مستوى الانزلاق مضروباً في متجه بورجر . وهذه القوة تكون دائماً في اتجاه عمودى على خط الإنخلاع .



شكل ( ١٩ - ٢٣ )

ويكون انحناء الانخلاع المثبت من طرفيه بتأثير هذه القوة تماماً كانهاء الأوتار المشدودة . فإذا اعتبرنا انخلاع AB مثبتاً من طرفيه يتقوس تحت تأثير قوة F .

نأخذ قطعة من الانخلاع طولها  $\delta l$  تعمل زاوية  $\delta \theta$  عند مركز الانحناء كما هو مبين في الشكل ( ١٩ - ٢٣ ) .

ونفرض أن T هو الشد في الانخلاع .

وبتحليل القوة المؤثرة على هذا الجزء تكون القوة  $F \delta l$  مساوية لمركبتى الشد في الاتجاه

الأفقى بينما يتلاشى مركبتى الشد  $T \cos \frac{\delta \theta}{2}$  في الاتجاه العمودى .

$$F \delta l = 2 T \sin \frac{\delta \theta}{2}$$

أى أن

وإذا كانت  $\delta \theta$  صغيرة فإن

$$\therefore F = T \left( \frac{\delta \theta}{\delta l} \right)_{\delta \theta \rightarrow 0}$$

ومن تعريف نصف قطر الانحناء  $\rho$  فإن

$$\rho = \lim_{\delta \theta \rightarrow 0} \left( \frac{\delta l}{\delta \theta} \right)$$

$$T = G b^2$$

ومن طاقة الانخلاع فإن الشد فيه يساوى

$$\rho = \frac{G b}{\sigma}$$

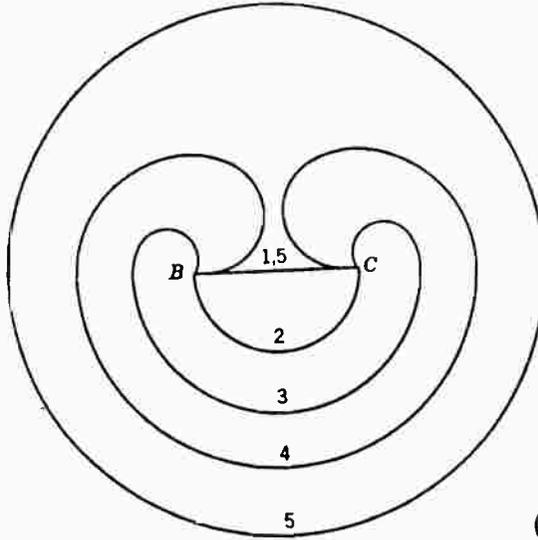
وعلى ذلك فإن :

أى أن نصف قطر الانحناء يقل كلما ازداد الاجهاد على مستوى الانزلاق . أى أن الانخلاع يزداد تكورا كلما إزداد الإجهاد عليه .

مصدر تكاثر الانخلاع لفرانك ويريد Frank - Read source :

· اعتبر الجزء من الانخلاع المثبت من طرفيه عند B,C عند التأثير بإجهاد  $\sigma$  تكون القوة المؤثرة على خط الانخلاع هي  $\sigma \cdot b$  حيث b هو متجه بورجر ، ويتوقف نصف قطر انحناء خط الانخلاع على الإجهاد  $\sigma$  .

إذا زيد الإجهاد تدريجيا ، وازدادت القوة المؤثرة على الانخلاع بالتبعية يزداد تقوس خط الانخلاع حتى يصبح نصف دائرة كما هو مبين بشكل ( ١٩ - ٢٤ ) وبعدها يصبح الوضع غير مستقر فيتمدد الانخلاع باطراد كما مبين حتى يتقابل فرعا الانخلاع



شكل ( ١٩ - ٢٤ )

ويكون عندئذ متجهى بورجر للفرعين المتقابلين فى اتجاهين متضادين فيلاشى أحدهما الآخر ، وينتج عن استمرار التمدد حلقة دائرية من الانخلاع يعود بعدها خط الانخلاع الأسمى C إلى ما كان عليه ، ويعيد الكرة مرة بعد أخرى مكونا حلقات متتالية من

## الانخلاعات .

ويتسبب خروج هذه الانخلاعات المتتالية لسطح البلورة في ظهور ما يسمى بمنطقة انزلاق slip band تجعل من مستوى الانزلاق الموجود عليه مصدر فرائك وريد للتكاثر مستوى نشط ، بخلاف المستويات الذرية الأخرى التي لا تظهر أى انزلاق .

## مسائل علي الباب التاسع عشر

١ - كم من السرعات تتحرر نتيجة زوال الانخلاعات من 20 cc من النحاس المشغل على البارد cold-worked عند تخميره في درجة حرارة مرتفعة إذا كانت الكثافة الابتدائية للانخلاعات  $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . اعتبر أن طاقة الإنخلاع هي 1 eV لكل طول  $1^\circ \text{A}$ .

٢ - بلورة أحادية من النحاس بها حد مزاح نوزاوية صغيرة low angle tilt boundary على المستوى (010) ومحور الإزاحة tilt axis يوازي الاتجاه [001]. أوجد زاوية الإزاحة إذا كان البعد بين كل انخلاعين في المستوى  $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ .

٣ - أوجد قيمة الإجهاد الحرج الذي يبدأ في تشغيل مصدر فرانك وريد لتكاثر الانخلاع إذا كان طول فرع شبكة الانخلاعات بالبلورة هو  $10^{-4} \text{ cm}$  وامتجه بورجر  $b = 2.5 \times 10^{-8} \text{ cm}$ .  
(معامل القص للبلورة  $G = 2 \times 10^{11} \text{ dynes / cm}^2$ )

## النظام الدولي للوحدات

المتر : طول مسار الضوء فى الفراغ لمدة ( 1/299 792 458 ) من الثانية .

الكيلوجرام : وحدة الكتلة .

الثانية : المدة الزمنية التى تعادل ( 9192631770 ) بورة إشعاع بين المستويات

الدقيقة الأرضية للطاقة فى ذرة سيزيوم ١٣٣ .

الأمبير : هو التيار الذى إذا مر فى سلكين لا نهائين ومتوازيين فى الفراغ تحدث بين

السلكين قوة تساوى  $2 \times 10^{-7} \text{ N m}^{-1}$

كلفن : وحدة الدرجة الترموديناميكية وتساوى ( 1/273.16 ) من الدرجة

الترموديناميكية للنقطة الثلاثية للماء .

المول : كمية المادة فى نظام يحتوى على مكونات أولية كعدد الذرات فى ( 0.012kg )

من الكربون ١٢ .

كاندلا : الشدة الضيائية فى اتجاه ما من مصدر إشعاع أحادى اللون تردده

(  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$  ) وتكون شدته الإشعاعية فى هذا الاتجاه ( 1 / 683 )

واط لكل ستريديان .

$$\pi = 3.141\ 592\ 653 \dots$$

$$e = 2.718\ 281\ 828 \dots$$

$$\ln 10 = 2.302\ 585\ 092 \dots$$

$$1 \text{ in} = 25.4 \text{ mm} \quad 1 \text{ lb} = 0.453 \text{ kg}$$

$$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m} \quad 1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$$

$$1 \text{ mile} = 1.609344 \text{ km}$$

## الثوابت الفيزيائية الأساسية

القيمة	الرمز	الكمية
$299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$	C	سرعة الضوء في الفراغ
$4\pi \times 10^{-7}\text{ N A}^{-2}$	$\mu_0$	قابلية الفراغ permeability
$8.85 \times 10^{-12}\text{ F m}^{-1}$	$\epsilon_0$	نفاذية الفراغ permittivity
$6.67 \times 10^{-11}\text{ m}^3\text{ kg}^{-1}\text{ s}^{-2}$	G	ثابت نيوتن للجاذبية
$6.626 \times 10^{-34}\text{ J s}$	h	ثابت بلانك
$1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$	e	شحنة الإلكترون
$2.07 \times 10^{-15}\text{ wb}$	$\phi_0$	كمية الفيض المغنطيسي ( $h/2e$ )
$4.83597 \times 10^{-14}\text{ HzV}^{-1}$	$2e/h$	نسبة تردد إلى فولط جوزيفن
$25812.8\ \Omega$	$R_H$	مقاومة هول المكماة ( $h/e^2$ )
$10973731\text{ m}^{-1}$	$R_\infty$	ثابت ريدبرج
$0.529177 \times 10^{-10}\text{ m}$	$a_0$	نصف قطر بوهر
$2.818 \times 10^{-15}\text{ m}$	$r_e$	نصف قطر الإلكترون
$9.274 \times 10^{-24}\text{ J T}^{-1}$	$\mu_B$	بوهر ماجنتون ( $eh/2m_e$ )
$9.109 \times 10^{-31}\text{ kg}$	$m_e$	كتلة الإلكترون
$1.6726 \times 10^{-27}\text{ kg}$	$m_p$	كتلة البروتون
$1.6749 \times 10^{-27}\text{ kg}$	$m_n$	كتلة النيوترون
$6.022 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$	$N_A$	ثابت أفوجادرو
$96485309\text{ C mol}^{-1}$	F	ثابت فاراداي
$8.31451\text{ J mol}^{-1}\text{ K}^{-1}$	R	ثابت الغاز الجزيئي
$1.38 \times 10^{-23}\text{ J K}^{-1}$	k	ثابت بولتزمان ( $R/N_A$ )
$5.67 \times 10^{-8}\text{ wm}^{-2}\text{ K}^{-4}$	$\sigma$	ثابت ستيفان - بولتزمان

9.80665 m s <sup>-2</sup>	g	عجلة الجاذبية للسقوط الحر
101325 Pa	atm	الضغط الجوي القياسي
1.66 × 10 <sup>-27</sup> kg	a.m.u	وحدة الكتلة الذرية ( a.m.u )
1.602 × 10 <sup>-19</sup> J	eV	الإلكترون فولط

### بعض التكاملات القياسية

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} dx = \sqrt{\pi}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2 e^{-x^2} dx = 1/2 \sqrt{\pi}$$

$$\int_0^{\infty} x e^{-\lambda x} dx = 1/\lambda^2$$

$$\int_0^{\infty} x^2 e^{-\lambda x^2} dx = 1/4 \sqrt{\frac{\pi}{\lambda^3}}$$