كلية العلوم

القسم : **الفيزياء**

السنة : **الثالثة**

المادة : حالة صلبة١

المحاضرة: الثامنة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

2025

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

هذه الحالة ذرة تخلليه ذاتية. يحدث هذا النوع من العيوب في المواد البلورية التي لها كثافة تعبئة ذرية منخفضة. تحتاج هذه العملية إلى طاقة كبيرة لكي تحدث ولذلك فهي تتم فقط عند درجات الحرارة العالية أو عند التأثير على المادة الصلبة بشعاع من الطاقة مثل شعاع النيوترونات.

4-5 العيوب الخطية LINE DEFECTS

يعتبر الإنخلاع أكثر العيوب الخطية شيوعا. والانخلاع هو عبارة عن خط منتظم من الذرات التي غابت عن مكانها (misplaced atoms) فى الشبيكة البلورية. غالبا، يمتد هذا الخط مسافة كبيرة نسبيا داخل الشبيكة. يمكن تقسيم الإنخلاعات إلى إنخلاع الحافة و الإنخلاع اللولبي. سنشرح هذه الأنواع بشئ من التفصيل في الفصل التالي.

يوجد العديد من الشواهد العملية على وجود العيوب الخطية في المواد البلورية منها:

1- اختلاف الخصائص الميكانيكية للمواد الصلبة عما هو متوقع، حيث وجد أن قيم العديد من الخصائص الميكانيكية للمواد الصلبة أقل بآلاف المرات من القيم المتوقعة بالنسبة للبلورات المثالية.

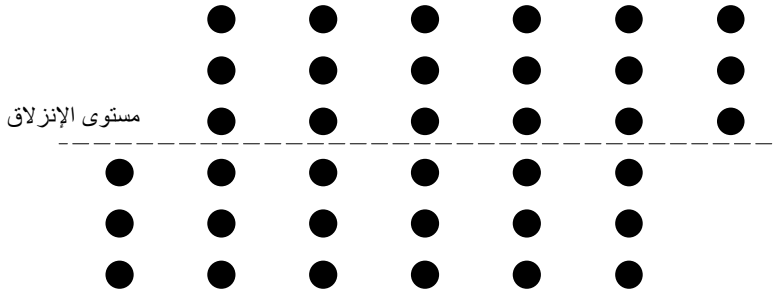
2- في تجارب تشتت الأشعة السينية وجد أن شدة الحيود في البلورات الحقيقية يختلف كثيرا عن شدة الحيود المحسوبة على أساس افتراض أن التركيب البلوري مثالي أي لا يتضمن عيوب خطية.

3- وجد أن بعض المحاليل الكيميائية تؤثر على مناطق معينة من سطح البلورة (على صورة تآكل) أكثر من تأثيرها على المناطق الأخرى، حيث وجد أن المناطق التي تتأثر أكثر هي تلك التي تتجمع عندها العيوب الخطية.

4- وجد اختلافا كبيرا بين معدل نمو البلورة المقاس ومعدل النمو المحسوب على أساس افتراض وجود بلورة مثالية.

5- يمكن باستخدام الميكروسكوب الالكتروني رؤية العيوب الموجودة في العينة مباشرة حيث تظهر الإنخلاعات كخطوط معتمة على شاشة فلورسينية.

الإنخلاع، كما ذكرنا من قبل، هو عيب خطى يوجد في البلورة ويتضمن عدد كبير من الذرات مرتبة حول خط. عند التأثير بقوة خارجية على بلورة فإنها تتعرض لإجهاد يحدث تشوها من الممكن أن يكون هذا التشوه مرنا أو غير مرن. في حالة التشوه المرن تعود البلورة إلى شكلها الأصلي بعد إزالة القوة المؤثرة. ولكن عند تعريض البلورة لإجهاد أكبر فإنه يحدث للبلورة تشوها غير مرن (دائم) عن طريق الانزلاق. يؤدى الإجهاد إلى حدوث انفعال في الشبيكة البلورية ينتج عنه إزاحة للذرات عن مواضع اتزانها الأصلية وعندما يكون الإجهاد كبيرا فإن الانفعال يكون على صورة زحفا ملموسا لعدد كبير من الذرات مكونا تشوها غير مرن يسمى بالإنخلاع. يبين الشكل 4-10 عملية انزلاق للمستويات البلورية بمقدار خطوة مقدارها ذرة واحدة.

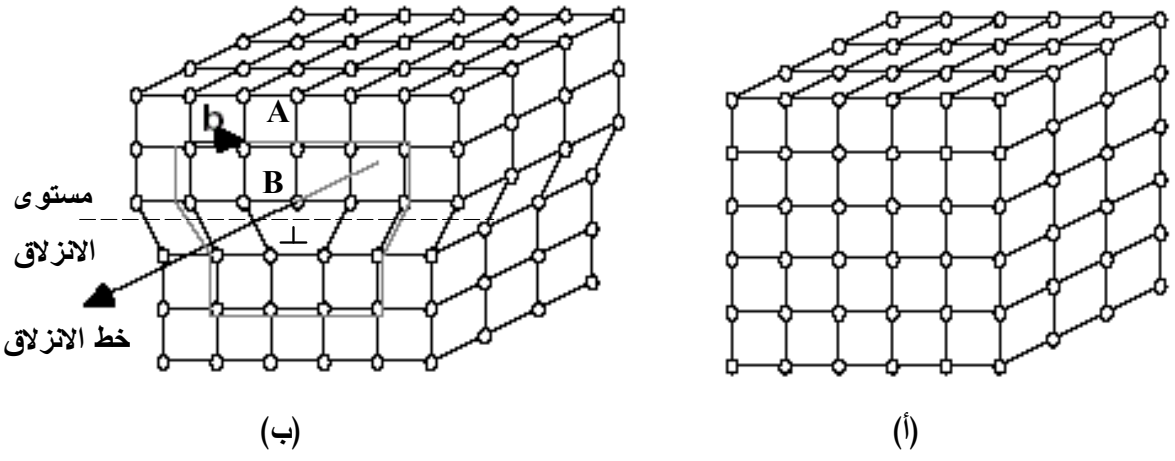


الشكل 4-10 عملية انزلاق للمستويات البلورية بمقدار ذرة واحدة.

عادة تتكون الفراغات الناتجة عن الإنخلاع بالقرب من الأسطح الحرة وبالقرب من حدود الحبيبات وأيضا بالقرب من الإنخلاعات. فيما يلى سنناقش النوعين الأساسين من الإنخلاعات وهما: إنخلاع الحافة أو النهاية والإنخلاع اللولبي (Screw dislocation).

4-5-1 إنخلاع الحافة EDGE DISLOCATION

يجمع الشكل 4-11 رسم تخطيطي لبلورة غير مشوهه بمعنى لا تحتوى على عيوب (الجزء (أ)) وبلورة مشوهة يوجد بداخلها إنخلاع حافة(الجزء (ب) من الشكل) بقصد توضيح المفهوم وتسهيل المقارنة.



الشكل 4-11 إنخلاع الحافة داخل الشبيكة البلورية.

يمكن تفسير إنخلاع الحافة على أساس أن هناك جزء من مستوى زائد محشور

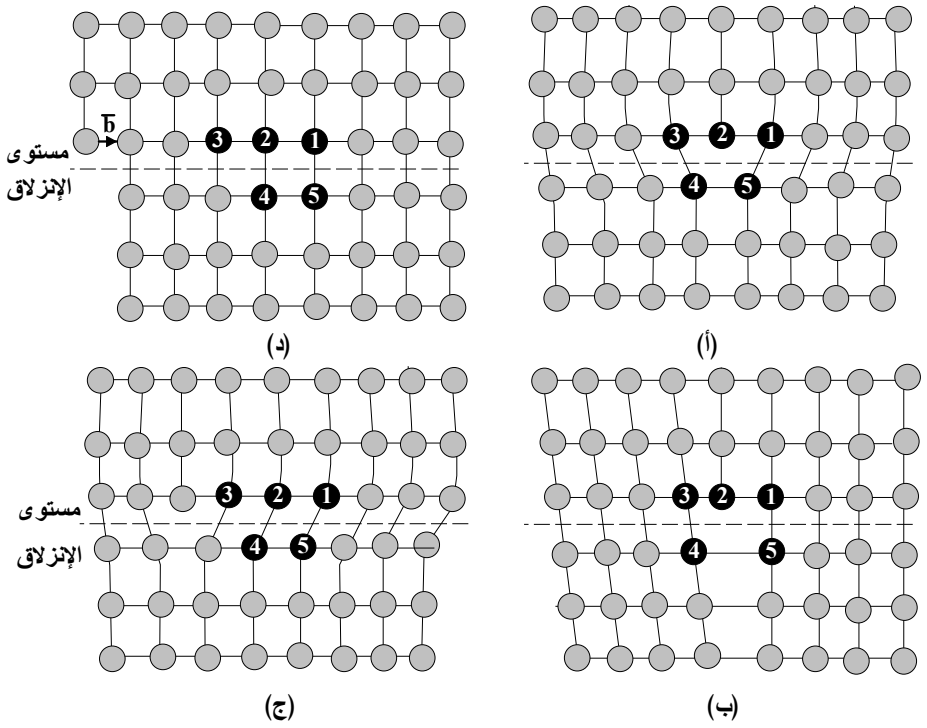
داخل البلورة (الجزء AB في الشكل 4–11(ب)). ينتج عن هذا الجزء تولد إجهاد ضغط على بعض مناطق الجوار وإجهاد شد على المناطق الأخرى وهذا يؤدى إلى زيادة طاقة الوضع على امتداد خط الإنخلاع. يلاحظ أن جزء البلورة الذي يوجد فيه جزء المستوى الزائد يحدث له ضغط، أي تكون ذراته مضغوطة بعضها مع بعض ، بينما يحدث للجزء السفلى تمدد بسبب غياب جزء من المستوى. يرمز لإنخلاع الحافة بالرمز $\perp$.

ينزلق الإنخلاع على المستويات الواقع عليها خط الإنخلاع أثناء عملية تشكيل المواد البلورية عند التأثير عليها بإجهادات قص، وبذلك يمكن تخفيض سمك أو أقطار المواد المعدنية عند تشكيلها. يوصف الإنخلاع بمقدار الانزلاق الحادث وذلك بواسطة متجه يعرف بمتجه بيرجر (Burger vector) أو متجه الانزلاق (slip vector). يعرف هذا المتجه بأنه الخطوة التي يخطوها الإنخلاع عند الانزلاق.

يرمز لمتجه الانزلاق بالرمز $\vec{b}$، ويكون مقداره هو المسافة التي ينزاحها الإنخلاع في الخطوة الواحدة وتتحدد بدلالة البعد الذرى، فعلى سبيل المثال فى البلورة المكعبة من الممكن أن تكون الإزاحة عبارة عن مضاعفات صحيحة لمتجهات انتقال الشبيكة، أي خطوة واحدة (a) أو خطوتين ($2a$) أو ثلاث خطوات ($3a$).... وهكذا، حيث a هي المسافة البينية للذرات (طول ضلع المكعب). يكون اتجاه حركة الإنخلاع أو متجه الانزلاق عموديا على خط الإنخلاع.

يبين الشكل 4–12 حركة إنخلاع حافة بمقدار خطوة واحدة وذلك عند التأثير علي

الإنخلاع بإجهاد قص. تم تمييز 5 ذرات بلون أسود وذلك لسهولة تتبع حركة الإنخلاع من خلال سياق الأشكال من (أ) إلى (د). يسمى إنخلاع الحافة أحيانا بالإنخلاع الطرفي.



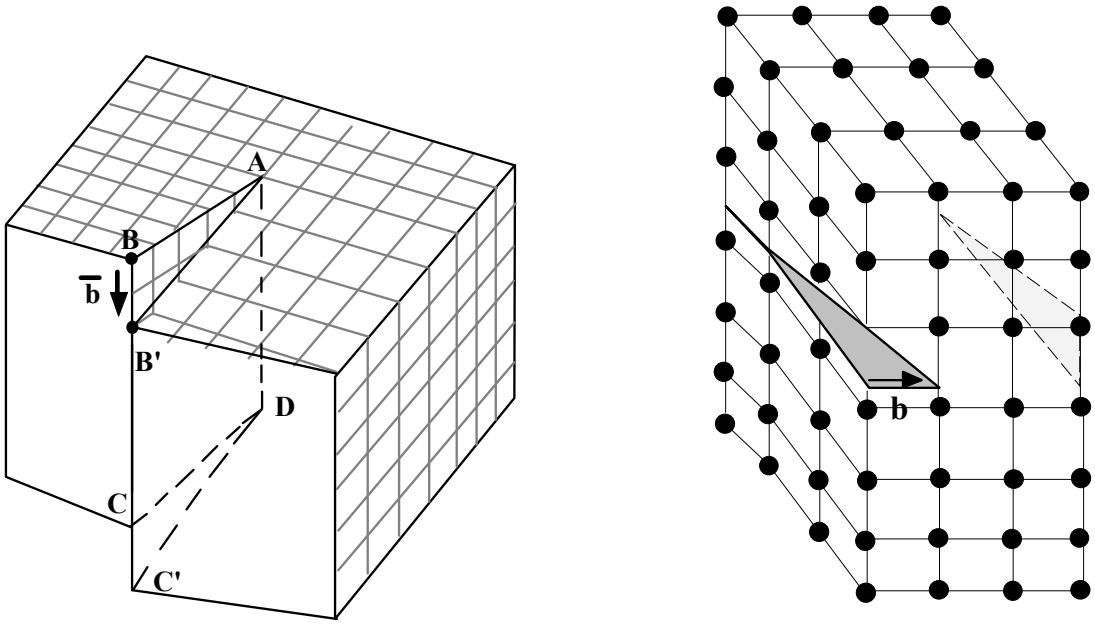
الشكل 4–12 سياق حركة إنخلاع حافة عند التأثير عليه بإجهاد قص بمقدار خطوة واحدة $\vec{b}$.

4–5–2 الإنخلاع اللولبي SCREW DISLOCATION

في الإنخلاع اللولبي تكون فيه إزاحة الذرات أثناء حركتها على امتداد خط الإنخلاع ويكون متجه الانزلاق موازيا لخط الإنخلاع على عكس ما هو الحال عليه في إنخلاع الحافة، كما يبين الشكل 4–13 (أ). بالإضافة إلى ما سبق، تكون الطاقة الناتجة من هذا الإنخلاع أكبر منها في حالة الإنخلاع الطرفي.

بالرجوع إلى الشكل 4–13 (ب)، وحتى يمكن تخيل الإنخلاع اللولبي، نعتبر أنه حدث قطع في البلورة في المستوى ABCD، كما هو موضح، وأن الجانب الأيسر من

البلورة انزلق أعلى الجانب الأيمن. يكون الخط AD هو الإنخلاع الذي تنتهي عنده الخطوة BAB′ والتي تكونت من الانزلاق. وجاءت تسمية هذا الإنخلاع باللولبي من أنه إذا تحركنا من المستوى الذرى حول الإنخلاع فإننا نجد أن المستوى يكون حلزوني. ينشأ الإنخلاع اللولبي نتيجة تطبيق إجهاد قصي جزئي ويكون خط الإنخلاع موازيا لمتجه الخطوة.



ب- حركة الانخلاع اللولبى أثناء نمو البلورة

أ- انخلاع لولبى

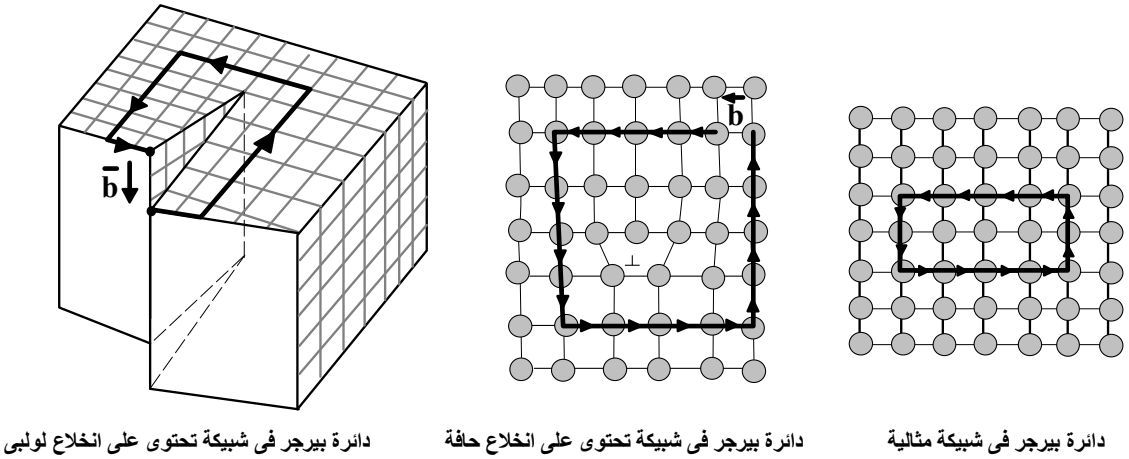
الشكل 4–13 الإنخلاع اللولبي.

تتكون الإنخلاعات، بشكل عام، في الشبيكة البلورية أثناء تجمد مصهور المادة وتكون النظام البلوري. فعندما يحدث اختلال بسيط في اتجاه نمو صفوف الذرات المجاورة نجد أن جزء زائد من الصفوف أو جزء ناقص يفرض نفسه داخل البلورة ويكوّن إنخلاعاً.

4-5-3 متجه ودائرة بيرجر BURGERS VECTOR AND CIRCUIT

يمكن وصف الإنخلاع سواء كان إنخلاع حافة أو إنخلاع لولبي بواسطة متجه إزاحة يسمى متجه بيرجر وهذا المتجه يغلق المسار الذي يحيط بخط الإنخلاع والذي يسمى دائرة بيرجر (Burger circuit). وتتكون دائرة بيرجر عن طريق الانتقال خلال المنطقة ذات الترتيب المنتظم حول الإنخلاع بخطوات عبارة عن مضاعفات صحيحة لمتجهات انتقال الشبيكة في الاتجاهات الأربعة.

كما هو موضح في الشكل 4-14 في البلورة المثالية فإن دائرة بيرجر تغلق نفسها ولا يتواجد متجه بيرجر. أما في حالة البلورة غير المثالية والتي يوجد بها عيوب فإن دائرة بيرجر تكون مفتوحة ويكون متجه بيرجر هو المتجه الذي يغلق الدائرة. يكون متجه بيرجر عموديا على خط إنخلاع الحافة ويقع في مستوى الانزلاق وتكون قيمته محددة وتتوقف على طبيعة دورية الشبيكة البلورية وتعتمد أيضا على ميكانيكية الانزلاق. تكون قيمة متجه بيرجر لوحدة الإنخلاع مساوية لثابت الخلية.



الشكل 4-14 خصائص دائرة ومتجه بيرجر في شبيكة بلورية.

يلخص الشكل 4–14 خصائص دائرة ومتجه بيرجر في شبيكات بلورية مثالية (تامة) وأخريات تحتوى على إنخلاعات.

4–6 العيوب المستوية PLANER DEFECTS

العيوب المستوية هي العيوب الواقعة بين سطحين، (Interfacial). يمكن تصنيف العديد من أنواع الأسطح في المواد الصلبة إلى الفئات الآتية:

1- الأسطح بين المواد الصلبة والغازات وتسمى أسطح حرة.

2- الأسطح بين المناطق التي يوجد فيها تغير في التركيب الذرى مع الحفاظ على دورية ترتيب الذرات وتعرف هذه الأسطح بحدود المناطق (domain boundaries).

3- الأسطح بين بلورتين أو حبيبتين لهما نفس الطور حيث يوجد فرق في اتجاه ترتيب الذرات عبر هذا السطح، وتسمى هذه الأسطح حدود الحبيبة (grain boundaries).

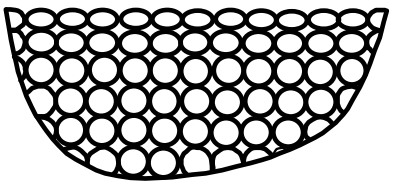
4- الأسطح بين الأطوار المختلفة للمادة وتسمى حدود الطور (phase boundaries)، حيث يوجد، بشكل عام، تغير في التركيب الكيميائي والترتيب الذرى عبر السطح بين الأطوار.

5– العيوب الناتجة عن أخطاء التعبئة (الرص).

تتكون حدود الحبيبات على وجه الخصوص فى المواد الصلبة المتبلورة، بينما تتواجد كل من الأسطح الحرة و حدود المناطق و حدود الطور في كل من المواد الصلبة المتبلورة وغير المتبلورة.

4-6-1 الأسطح الحرة FREE SURFACES

تملك جميع المواد الصلبة أسطح حرة بسبب حجمها وشكلها المحدد. يختلف ترتيب الذرات على السطح الحر عن الذرات الموجودة في عمق البناء وذلك لاختلاف البيئة المحيطة بذرات السطح لعدم وجود ذرات مجاورة في أحد الجوانب. عادة، يكون للذرات القريبة من السطح نفس التركيب البلوري ولكن يوجد اختلاف صغير في متغيرات الشبيكة عنها في حالة الذرات الموجود في العمق، وهذا يمثل نوعا من التشوه، كما يوضح الشكل 4-15.



الشكل 4-15 تصور مبسط للتشوه الذي يحدث عند سطح المادة المتبلورة.

ربما تكون أهم سمة للأسطح الحرة هي طاقة السطح المصاحبة لأسطح أي جسم صلب. يمكن رؤية مصدر طاقة السطح هذه باعتبار بيئة كل من الذرات على السطح والذرات الموجودة في الداخل. فمثلا، لكي يتم جلب ذرة من الداخل إلى السطح يجب إحداث كسر أو تشوه بعض الروابط وبذلك تزداد الطاقة. ويمكن تعريف طاقة السطح بأنها مقدار الزيادة في الطاقة لكل وحدة مساحة من السطح الجديد المتكون. في المواد المتبلورة تعتمد طاقة السطح على الاتجاه البلوري للسطح. الأسطح التي تكون عبارة عن مستويات ذات تعبئة ذرية كثيفة يكون لها طاقة سطح صغيرة، وذلك بسبب صغر نسبة

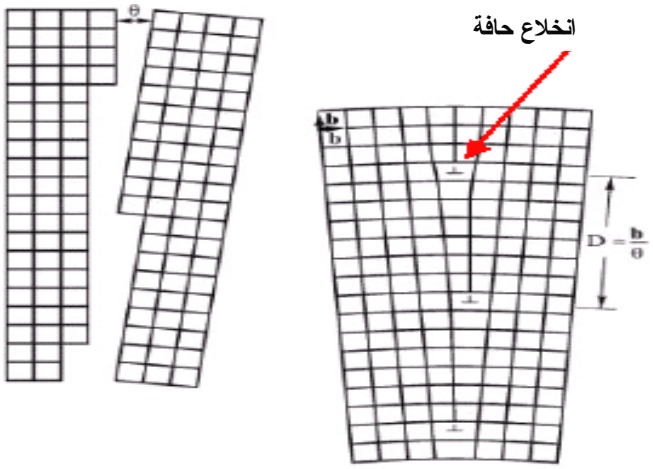
روابط الذرات المكسورة والموجودة على هذه الأسطح. وهذا يعنى أن للذرات عدد كبير من أقرب الجيران في مستوى السطح. تتراوح قيم طاقة السطح في المواد الصلبة من 10 جول/م^2 إلى 1 جول/م^2. بشكل عام، يمكن القول أنه كلما كانت الروابط قوية في البلورة فإن طاقة السطح تكون أعلى.

يمكن تقليل طاقات السطح عن طريق إمتزاز ذرات أو جزيئات غريبة من الهواء. على سبيل المثال، في مادة الميكا تكون طاقة السطح المقطوع تحت ضغط مخلخل أعلى بكثير منها في حالة نفس السطح المقطوع في الهواء. يقوم الأكسيجين الممتز من الهواء بواسطة السطح المقطوع بتعويض الروابط المكسورة نتيجة القطع. من المستحيل حفظ أسطح المواد الصلبة نظيفة بشكل تلقائي بسبب عملية إمتزاز السطح لذرات الشوائب، ويترتب على ذلك أن خصائص السطح مثل الانبعاث الالكتروني، معدلات التبخر ومعدلات التفاعلات الكيميائية تعتمد، إلى حد بعيد، على وجود أي شوائب ممتزة. سوف تختلف هذه الخصائص إذا تمت القياسات تحت ظروف تعطى إمتزاز مختلف على السطح.

4-6-2 حدود الحبيبة GRAIN BOUNDARIES

الحبيبة هي تجمع بلوري بحيث تكون جميع وحدات خلايا الحبيبة الواحدة منتظمة في نسق إتجاهى خاص بها ولها حدود خارجية (سطح) تفصلها عن الحبيبات المجاورة وهكذا فإن حدود الحبيبة تفصل بين مناطق ذات توجيه بلوري مختلف. أبسط شكل لحدود

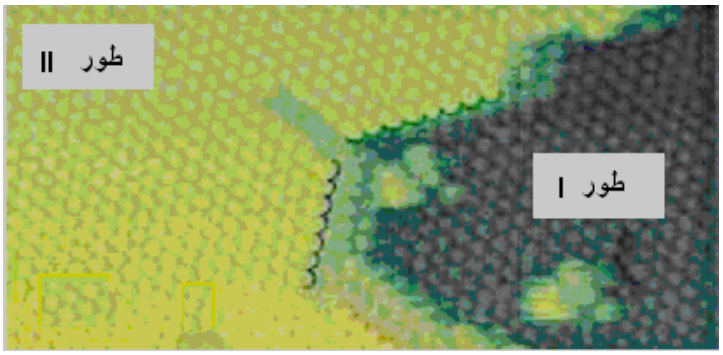
الحبيبة يكون عبارة عن سطح بيني يتكون من صفوف متوازية من إنخلاعات حافة. يسمى هذا النوع الخاص من الحدود بالحد المائل وذلك لأن عدم التوجيه يكون في شكل ميل صغير على محور موازى للإنخلاعات، كما يوضح الشكل 4–16. يكون التركيب الناتج مكافئ لإنخلاعات حافة مفصولة بمسافة تساوى $\frac{b}{\theta}$، حيث b هو طول متجه بيرجر و θ هي زاوية ميل الإنخلاعات. يشار إلى الحد المائل بحد الزاوية المنخفضة عندما تكون زاوية عدم التوجيه أقل من 10°.



الشكل 4–16 تركيب حد حبيبة مبسط يسمى بالحد المائل لأنه يتكون عندما تميل حبيبتين متبلورتين على بعضهما بعض بزاوية مقدارها بضع درجات.

عندما يكون لحد الحبيبة عدم توجيه أكبر من 10° أو من 15° درجة، فإنه من الناحية العملية لا يمكن التفكير بأن الحد مركب من إنخلاعات لأن المسافة الفاصلة بين الإنخلاعات سوف تصبح صغيرة، الأمر الذي معه تفقد الإنخلاعات تماثلها الخاص. يمثل حد الحبيبة منطقة لها إتساع يساوى ثخانة مقدارها بضع ذرات، حيث يوجد انتقال (تغير) في الدورية الذرية بين البلورات أو الحبيبات المتجاورة

لحدود الحبيبة طاقة سطح بيني (interfacial energy) ناتج عن الاضطراب في الدورية الذرية للمنطقة المجاورة للحد أو بسبب الروابط المكسورة التي توجد على السطح البيني. عموما، تكون طاقة السطح البيني أقل من طاقة السطح الحر وذلك لأن الذرات في حدود الحبيبة تكون محاطة من كل الجوانب بذرات أخرى وعدد الروابط المكسورة أو المشوهة فيه يكون أقل. يطلق على المواد الصلبة التي تحتوى على حدود حبيبات بالمواد المتعددة التبلور، حيث أن البناء التركيبي يتكون من العديد من المناطق (البلورات) يكون لكل منها توجيه بلوري مختلف، كما يبين الشكل 4–17.

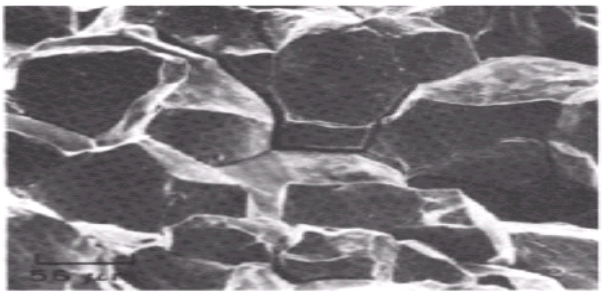


الشكل 4–17 سطح مكون بين طورين.

4–6–3 حدود الطور PHASE BOUNDARIES

يعرف الطور بأنه جزء أو منطقة من المادة قابلة للانفصال وتكون متجانسة ولها تركيب فيزيائي وكيميائي معين. توجد الأطوار في شكل سائل متجمد تخللي، أو سائل متجمد تعويضي أو سبيكة منتظمة التركيب أو مركبات ومواد أمورفية (غير متبلورة) أو حتى على شكل بخار عناصر نقية. يوجد الطور المتبلور في الحالة الصلبة في شكل بلورة واحدة أو فى شكل متعدد التبلور. يبين الشكل 4–18 صورة لسطح كسر فولاذ لا

يصدأ مأخوذة بواسطة ميكروسكوب الكتروني ماسح يظهر وجود أطوار عديدة.



الشكل 4-18

تتركب المواد الصلبة التي تتكون من أكثر من عنصر، عادة، من عدد من الأطوار. تجد مثل هذه المواد الكثير من التطبيقات، فعلى سبيل المثال، يتركب مثقاب الأسنان، الذي لا ننسى الألم الذي سببه لمعظمنا، من خليط من بلورات كربيد السليكون الصغيرة تحيط هيكل من معدن الكوبالت. هنا، يكون الكوبالت طور متصل وطور أخر يتماسك مع بلورات كربيد السليكون التي تتميز بصلابتها العالية. وعموما، يشار إلى المواد المتعددة الطور، مثل المادة السابق ذكرها بمواد مركبة (composite materials)، وتجد هذه المواد أهمية كبيرة في مجال الهندسة وذلك لأن لها العديد من الخصائص المميزة التي تجعلها أفضل من المواد وحيدة الطور في الكثير من التطبيقات.

يؤثر التركيب البلوري والكيميائي على طبيعة الأسطح البينية للأطوار. عندما تكون الأطوار مختلفة في التركيب الكيميائي والبلوري فإن طبيعة السطح تكون شبيهه إلى حد كبير بسطح الحبيبة (حدود الحبيبة). وعندما تكون الأطوار لها نفس التركيب والتوجيه البلوري فإن الأسطح التي تفصل بينها ربما تكون مماثلة في الطاقة والتركيب لحدود الحبيبة ذات زاوية الميل الصغيرة.

يؤدى مفهوم أن المادة تتركب من أطوار متصلة وأطوار متقطعة إلى تصنيف بسيط لمختلف أنواع المواد المركبة. يقدم الجدول 4–1 بعض الأمثلة مصنفة طبقا للتركيب البنائى (مواد متبلورة أو مواد غير متبلورة) وطبيعة كل طور.

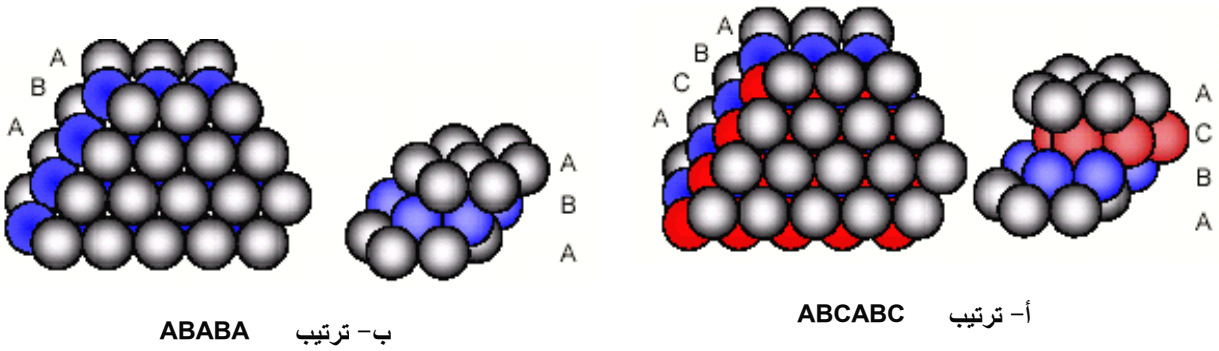
جدول 4–1 تصنيف المواد المركبة (المتعددة الأطوار)

طور متصل	طور (أطوار) متقطعة	أمثلة
متبلور	متبلور	كل الأنظمة المعدنية مثل الحديد الزهر ، الصلب، سبيكة اللحام، معظم الصخور الطبيعية مثل الجرانيت والرخام.
متبلور	غير متبلور	مواد ليس لها أهمية تطبيقية.
غير متبلور	متبلور	معظم المواد السيراميكية الصناعية، مثل قرميد البناء، البور سلين العازل كهربيا، البوليمرات المتماسكة جزئيا، بعض المركبات المتبلورة–البوليمريه.
غير متبلور	غير متبلور	الألياف الزجاجية، الزفت (الإسفلت)، الخشب، الأسمنت المتميع.

4–6–4 عيوب الرص (التعبئة) PACKING DEFECTS

بفرض أن البلورة عبارة عن رصات لمستويات تتكون من ذرات بعضها فوق بعض، وكان أحد المستويات مزاحا عن المستوى المجاور بإزاحة لا تساوى متجه في الشبيكة البلورية فإنه يتكون عيباً في التركيب يسمى خطأ رص. تحدث هذه الأخطاء في البلورات المتراصة مثل البلورة المكعبة المتمركزة الأوجه التي سوف تدرس لاحقا. يكون الرص في هذه البلورة ذات أنماط متعددة مثل الرص على الهيئة ABCABC أو الرص على الهيئة ABAB، كما هو موضح بالشكل4–19.

عندما ينتج ترتيب ABABC مثلا بدلا من الترتيب ABCABC فإننا نقول أنه حدث خطاء في الرص.



ABABA ب- ترتيب

ABCABC أ- ترتيب

الشكل 4-19 رسم توضيحي لرص مستويات من الذرات في بلورة مكعبة متمركزة الأوجه.

عندما ينتج ترتيب ABABC مثلا بدلا من الترتيب ABCABC فإننا نقول أنه حدث خطاء في الرص.

4-7 تعيين تركيز وطاقة التنشيط لتكوين الفراغ

DETERMINATION OF VACANCIES CONCENTRATION AND THE ACTIVATION ENERGY

لتعيين العلاقة بين طاقة تكوين الفراغ وعدد الفراغات عند درجة حرارة معينة يجب اعتبار أن البلورة في حالة اتزان حراري ديناميكي بمعنى أن عدد الفراغات التي تتكون في البلورة في وحدة الزمن يساوى عدد الفراغات التي تختفي من البلورة في نفس الزمن تماما مثل ما يحدث لسائل فى حالة اتزان ديناميكي مع بخاره. سوف نعتبر فيما يلى تكون عيب شوتكى. من القانون الثاني للديناميكا الحرارية نجد أن إجمالي الطاقة الحرة للنظام (طاقة هولمولتز)، يكون على الصورة،

$$F = H - TS\,, \qquad 1-4$$

حيث F هي الطاقة الحرة للنظام قيد الدراسة، H هو المحتوى الحراري (الانثالبى