جمهورية العراق

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة بابل

كلية التربية للعلوم الصرفة

قسم الفيزياء

العيوب التركيبية في البلورات (الفوائد والاستخدامات)

بحث تخرج مقدم إلى مجلس قسم الفيزياء في كلية التربية للعلوم الصرفة كجزء من متطلبات

الحصول على شهادة بكالوريوس تربية في الفيزياء

بحث تقدم به الطالب

أحمد حسين مهدي

الإشراف

أ . د . فؤاد شاكر

1447 هـ

2026 م

وقل ربي زدني علمًا

صدق الله العلي العظيم

سورة طه ، ايه 114

إلى شمس الله إلى بقية في أرضه إلى صاحب العصر والزمان

الحجة المنتظر (عجل الله فرجة)

اهدي تخرجي وفرحتي لمن لهم الفضل في ذلك إلى من

أوصاني الرحمن بها إلى من جنة الله تحت قدميها إلى من

أفنت عمرها من اجل أن تراني في أبهى صحة وسعادة ولو

على نفسها فهي تستحق أن اهديها فرحتي بل حياتي مسلماً لها

.... أمي ....

إلى الذي ساندني في هذه الدراسة وعلمني السلوك القويم واثأر

حياتي بقبسات الهداية وعلمني ايضاً أن الصبر هو طريق النجاح شكراً له

وقليل الشكر بحقه

.... ابي ...

الشكر والتقدير

اللهم لك الحمد حمدا كثيراً لا يعد ولا يحصى

اللهم لك الشكر على ما أسبغت به علي من نعمك الغزيرة أحمدك اللهي وأشكرك

عدد ما تتنفس الكائنات على ما يسرت لي من أعداد هذا البحث

كما أتوجه بجزيل الشكر والامتنان إلى

أ . د . فؤاد شاكر

كما أتوجه بالشكر الجزيل الى جميع أساتذتي في الكلية التربية للعلوم الصرفة/ جامعة بابل

قسم الفيزياء على ما بذلوه من جهد طوال السنوات الدراسية وقوفهم بجانبي لحظة بلحظة

طيلة أيام دراستي في هذه السنوات . . . . .

والله ولي التوفيق

قائمة المحتويات

ت	المحتويات	رقم الصفحة
	الآية	أ
	الإهداء	ب
	الشكر والتقدير	ج
	قائمة المحتويات	د
	الملخص	هـ
	الفصل الأول	1-5
1-1	المقدمة	2
2-1	البلورات	3
3-1	أنواع البلورات	4
4-1	هدف البحث	5
	الفصل الثاني	6- 28
1-2	العيوب البلورية	7
2-2	أقسام العيوب البلورية	7
3-2	أنواع العيوب البلورية	8
4-2	تعيين تركيز وطاقة التنشيط لتكوين الفراغ	27
	الفصل الثالث	29-38
1-3	فوائد العيوب البلورية	30
2-3	استخدامات العيوب البلورية	34
	الخاتمة	39
	النتائج	39
	المصادر	41-43

الملخص

يهدف هذا البحث إلى دراسة التركيب البلوري للمواد الصلبة مع التركيز على **العيوب البلورية** باعتبارها سمة أساسية في البلورات الحقيقية. وقد تم التوضيح أن البلورة المثالية ذات الترتيب الدوري الكامل تُعد حالة نظرية يصعب تحقيقها عمليًا، نتيجة للظروف المصاحبة لعمليات النمو والتحضير، مما يؤدي إلى ظهور أنواع مختلفة من العيوب في البنية البلورية.

استعرض البحث التصنيف العلمي للعيوب البلورية وفقًا لأبعادها وتأثيرها في الشبكة البلورية، حيث تم تقسيمها إلى:

- **عيوب نقطية** تشمل الفراغات، الذرات المتخللة، والشوائب (التعويضية والتخللية)، بالإضافة إلى عيوبي شوتكي وفرنكل في البلورات الأيونية .
- **عيوب خطية** تتمثل في الانخلاعات (الحافية واللولبية)، والتي تؤثر بشكل مباشر في سلوك المواد تحت تأثير الإجهادات الميكانيكية .
- **عيوب مستوية** مثل حدود الحبيبات، والأسطح الحرة، وحدود الأطوار، وأخطاء الرص، والتي ترتبط بوجود تغيرات في الترتيب البلوري عبر الأسطح البينية .

كما تناول البحث آليات تكوّن هذه العيوب من منظور الديناميكا الحرارية، موضحًا العلاقة بين طاقة التكوين، والإنتروبيا، وتركيز العيوب عند الاتزان الحراري، إضافة إلى دورها في تسهيل عمليات الانتشار الذري داخل المواد.

وقد أظهرت الدراسة أن العيوب البلورية لا تمثل مجرد اضطراب في التركيب، بل تُعد عاملًا حاسمًا في تحديد الخواص الفيزيائية للمواد. إذ تؤثر بشكل مباشر في الخصائص الكهربائية، والميكانيكية، والبصرية، والمغناطيسية، كما تلعب دورًا محوريًا في التطبيقات التكنولوجية، خاصة في أشباه الموصلات، والمواد المتقدمة، والتقنيات النانوية.

وبناءً على ذلك، يبرز مفهوم هندسة العيوب البلورية كأحد الاتجاهات الحديثة في علم المواد، حيث يتم التحكم المقصود في نوع وتركيز العيوب بهدف تصميم مواد ذات خصائص محسّنة تتناسب مع متطلبات التطبيقات الصناعية والتكنولوجية المتقدمة.

الفصل الأول
المقدمة
البلورات
أنواع البلورات
هدف البحث

1-1 المقدمة

يعتبر التنظيم الدوري للذرات في الباء البلوري من اهم الخصائص البلورية ولذلك، فإنه عند دراسة التركيب الذرى لبلورات المواد فإننا نهتم بمواضع الذرات في البلورة ونتأكد من وجود هذه الذرات فى أماكنها الدورية .وبالرغم من أن وجود العيوب البلورية في كثير من المواد الصلبة يؤدى إلى تحسين بعض خصائصها الفيزيائية إلاّ أن كثيرا ما راود العلماء حلم الحصول على بلورة تامة لدرجة الكمال المطلق في دوريتها ودقة وانتظام تركيبها وتأتى صعوبة ذلك بسبب الكثير من الصعوبات التي تحدث أثناء التحضير .تؤدى هذه الصعوبات إلى الإخلال في الدورية وعدم تكامل التناسق وإنتاج بلورة تحتوى على عيوب في التركيب.

وبالرغم من تقنيات التحضير المتقدمة إلا انه غالبا ما تحتوى البلورة المحضرة على بعض الذرات الغريبة وحتى عند تحضيرها بواسطة أفضل وسائل النمو البلوري فإنه تبقى بعض الشوائب (بتركيز $\sim CM\ ^{12}01^{-3}$)داخل البلورة وتجعل من الصعب تعيين التركيب البلوري الصحيح . وبناء على ما سبق، لا يكون للبلورات الحقيقية تركيب بنائي تام الانتظام وذلك بسبب وجود عيوب تختلف باختلاف أنواع وأبعاد البلورة .تتعدد العيوب البلورية فمنها :العيوب النقطية والعيوب الخطية والعيوب السطحية .العيوب النقطية هي عبارة عن وجود نقص في بعض نقط الشبيكة البلورية على شكل فراغات تمثل عدم وجود ذرة أو جزئ أو مجموعة من الذرات في نقطة ما بالشبيكة [1] .

من المدهش أن وجود العيوب فى البلورات يؤدى، فى كثير من الأحيان، إلى تحسين الكثير من الخصائص الفيزيائية لبعض المواد حيث يمكن الحصول على سبائك معدنية جديدة تتميز بمقاومة عالية للأحمال المؤثرة .كما تعود خاصية التوصيل الكهربي في بعض أشباه الموصلات

إلى وجود كمية ضئيلة من الذرات الشائبة، وكذلك تسبب هذه العيوب مراكز لونية (color centers) في بعض المواد مما يجعلها مناسبة للعديد من التطبيقات التكنولوجية هذا بالإضافة إلى ارتباط التألق الضوئي (photo– luminescence) بهذه الشوائب .

2-1 البلورات

يعد علم البلورات أحد فروع علم الجيولوجيا وهو العلم الذي يختص بدراسة البلورات من حيث شكلها الخارجي والداخلي ودراسة تركيب كل من الصخور والمعادن التي تحويها، ويُضاف إلى ذلك دراسة طرق تحديد البناء البلوري لكل من الأملاح والمعادن، وما يتضمنه ذلك من طرق حيود الأشعة السينية و طرق حيود الإلكترونات، والنيوترونات ويمكن من خلال هذه الطرق تعيين البناء البلوري المغناطيسي، وسيتحدث هذا المقال عن تعريف البلورة[2] .

وتعرف البلورة بأنها أي مادة صلبة تترتب الذرات المكونة لها بشكل منتظم ممثلا الترتيب الداخلي لها، وهذه المواد الصلبة إما أن تكون ذرات أو ذرات تتحد على شكل جزيئات، يمكن أن تتكون البلورات من جميع العناصر التي تتشكل طبيعيا والبالغ عددها ٩٢ عنصرا باستثناء عنصر الهيليوم الذي يمكن تبلوره عند درجات حرارة منخفضة مع تعرضه للضغط، وتقسم البلورات حسب عدد العناصر المكونة لها إلى بلورات ثنائية متكونة من عنصرين، وهناك الآلاف منها مثل بلورة كلوريد الصوديوم NaCl والألومينا Al2O3 والجليد H2O، وبلورات ثلاثية متكونة من ثلاثة عناصر .

3-1 أنواع البلورات

بعد ما تم تعريف البلورة يُذكر بأن للبلورة أربعة أنواع مختلفة، يختلف كل نوع منها عن الآخر بطريقة ترتيب الذرات المكونة لها مما يظهر كل منها بترتيب محدد وخصائص مختلفة، وسيتم ذكر أنواع البلورات فيما يأتي: [3]

1- البلورات التساهمية:

ترتبط ذرات البلورات التساهمية بروابط تساهمية تحدث عن طريق اشتراك الذرات في الالكترونات، وتعد هذه الروابط قوية جدا ويصعب كسرها ولهذا السبب تكون درجات انصهار هذا النوع من البلورات عالية جدا مثل بلورة الماس.

2- البلورات الأيونية

تتحد ذرات البلورات الأيونية بروابط أيونية ويتم ذلك بشحن ذرة سالبة والتي تقوم بجذب ذرات أخرى في البلورة مشحونة بشحنة موجبة حيث يتم ترتيب ذرات هذا النوع اعتمادًا على الشحنات، وتمتلك هذه البلورات الصلبة درجات انصهار عالية، ومن الأمثلة على البلورات الأيونية بلورة ملح الطعام.

3- البلورات الجزيئية

تعرف البلورات الجزيئية بأنها بلورات تتكون من ترابط ذراتها بالروابط الهيدروجينية التي تعتبر روابط ضعيفة جدا، ولذلك تكون درجات انصهارها قليلة جدا، ومن الأمثلة عليها بلورة الجليد وبلورة ثاني أكسيد الكربون المجمد، ويستخدم العلماء البلورات الجزيئية لتحديد شكل البروتينات المجهرية المختلفة داخل الخلايا.

4- البلورت المعدنية

تتكون البلورات المعدنية من المعادن، وتظهر هذه البلورات بشكل لامع، كما تعتمد نقطة انصهار هذه البلورات على نوع المعدن المكون لها، ومن الأمثلة على البلورات المعدنية بلورة النحاس التي يمكن من خلالها استخراج النحاس؛ لتشكيل الأسلاك النحاسية المستخدمة لنقل الكهرباء في المنازل. [3]

4-1 هدف البحث

التعرف على أنواع العيوب التركيبية البلورية المتضمنة الخطية والسطحية (الشبكية) والحجمية.

اضافة الى معرفة فوائدها واستخداماتها في التطبيقات الصناعية،

الفصل الثاني
العيوب البلورية
أقسام العيوب البلورية
أنواع العيوب البلورات

2-1 العيوب البلورية

تتعدد أنواع العيوب البلورية طبقا لمنشئها، فمثلا وكما ذكرنا من قبل، يعتبر سطح البلورة نوعا من أنواع التشوه وذلك بسبب تعطل التكرار والدورية عند السطح، حيث ترى الذرات القريبة من السطح بيئة محيطة مختلفة عما تراه الذرات الموجودة في عمق البلورة وبالتالي تسلك سلوكا مختلفا .وكذلك، يسبب الاهتزاز الحراري للذرات، حول مواضع اتزانها عند درجة حرارة أكبر من الصفر المطلق ، تشوها للبلورة بدرجة تعتمد على درجة الحرارة. كما يؤدى وجود ذرات غريبة في التركيب البلوري إلى خلق عيوبا تسمى بالشوائب. [4] .

2-2 أقسام العيوب البلورية : [5]

1- عيوب ساكنة، وهي العيوب الدائمة نتيجة تشوه التركيب البلوري

2- عيوب مؤقتة يمكن التخلص منها بالمعالجة المناسبة

3- عيوب الإثارة وتحدث نتيجة وجود مؤثر خارجي مثل المجال الكهربي المجال

المغناطيسي أو خلافه وتزول هذه العيوب بزوال المؤثر.

كما يمكن أيضا تصنيف العيوب البلورية طبقا لنوع التشوه التي تسببه هذه العيوب ، على النحو الآتي:

1- عيوب تتسبب في تشويه المنطقة المجاورة لها فقط من الشبيكة البلورية تشوها موضعيا محدودا لا يتعدى بضعة خلايا وحدة وتسمى هذه العيوب بالعيوب النقطية .(point defects)

2- عيوب تؤثر في صف بأكمله من صفوف الذرات الشبيكة البلورية، وتسمى هذه العيوب بالعيوب الخطية (line defects) أو الإنخلاعات (dislocations).

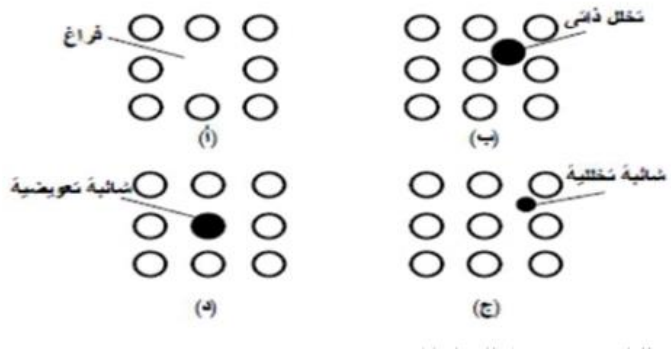
3- عيوب مستوية وتشترك فيها ذرات مستوى بلوري كامل سنتعرض في هذا الباب بالتفصيل لدراسة الأنواع المختلفة من هذه العيوب البلورية وتأثيرها على خصائص البلورة الفيزيائية.

3-2 - أنواع العيوب البلورية

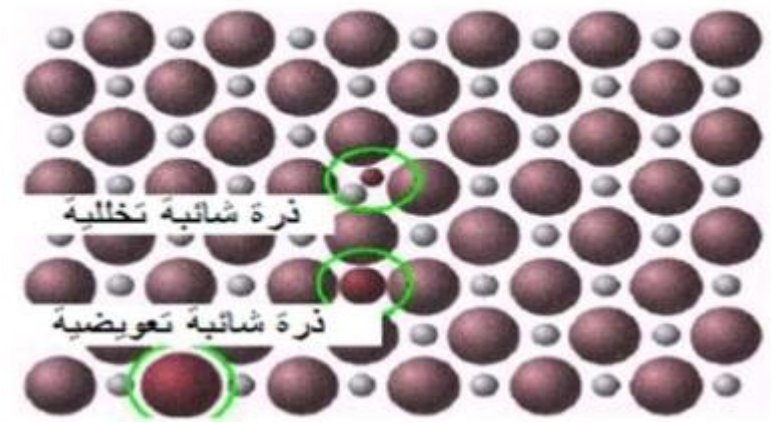
العيوب النقطية هي عيوب موضعية تنشأ من غياب ذرة عن مكانها في الشبيكة البلورية أو عن وجود ذرة زائدة في غير مكانها. يوجد نوعان من العيوب النقطية تكون متأصلة في المادة بمعنى أنها تنشأ أثناء نمو البلورة ومن دون أي تدخل خارجي هما الفراغ (vacancy) والذرة المتخللة (interstitial)، كما هو مبين بالشكل 1-1.

ينشأ الفراغ عندما تغيب الذرة عن مكانها في الترتيب الدوري للشبيكة البلورية، كما هو مبين بالشكل 1-1(أ). يكون النوع الثاني من العيوب النقطية عبارة عن وجود ذرة زائدة متخللة في التركيب البلوري، أي تحتل ذرة ما مكانا بين الذرات الأصلية، سواء كانت هذه الذرة أصلية من نفس نوع ذرات البلورة) ويسمى العيب في هذه الحالة تخلل ذاتي) (interstitial) ، كما هو مبين بالشكل 1-1 (ب) أو كانت ذرة غريبة وتسمى الشائبة. [1]

في الحالة الأخيرة، تحتل الذرة الشائبة مكانا بين الذرات الأصلية بين المستويات البلورية)، ويسمى العيب النقطي في هذه الحالة بالشائبة المتخللة (interstitial impurity) كما هو مبين بالشكل 1-1(ج). غالبا ما تكون مثل هذه الشوائب عبارة عن ذرات ذات حجم أصغر من الذرات الأم ويمكنها من شغل مكان بين المستويات الذرية للبلورة من دون إخلال ملحوظ في أبعاد البلورة، كما في حالة الهيدروجين في بلورة الكربون عندما تحل الذرة الغريبة محل ذرة أصلية في الترتيب البلوري يسمى العيب في هذه الحالة، بشائبة تعويضية (substitutional)، كما هو مبين بالشكل 1-1(د). يحدث هذا النوع من العيوب عندما تكون حجم الذرة الشائبة كبير ويقارب حجم ذرات البلورة الأصلية، كما في حالة ذرة النيكل في بلورة الحديد. في هذه الحالة لا يضطرب الترتيب البلوري ولكن فقط نوع الذرات في الشبيكة البلورية يكون مختلف.



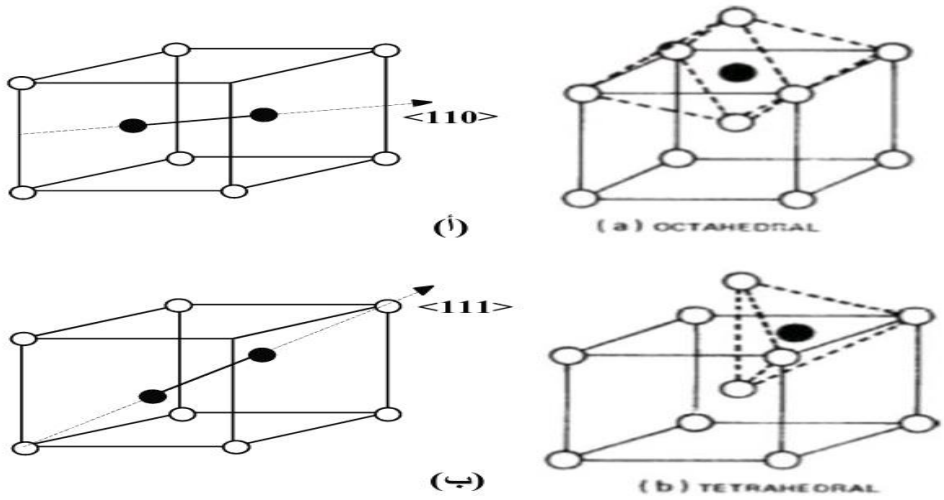
الشكل (2–1) يلخص ويجمع بين أنواع العيوب الناشئة عن وجود ذرات الشوائب في التركيب البلوري بقصد المقارنة.



الشكل (2–2) مقارنة العيوب النقطية الناتجة عن الشوائب

بالإضافة إلى تطابقها مع الذرات المضيفة (الأم) فإن الشوائب التخلليه والذرات التخلليه الذاتية تختلف في الطريقة التي تكمن بها في الشبيكة يبين الشكل 4–3، بلورة متمركزة الجسم، على سبيل المثال، تحتوى على ذرة متخللة. لكي تحتل الذرة المتخللة ذاتيا هذا المكان فإنها تزيح الذرة المضيفة عن مكانها الطبيعي في البلورة مكونة معها ما يسمى بزوج من الذرات على شكل الدمبل (dumbbell–shaped pair) (الدمبل هو كرتان حديديتان بينهما قضيب معدني، كما هو مبين في يسار الشكل 1–3 يتعين كل من اتجاه الدميل المتكون والمسافة بين الذرتين بواسطة الحالة التي معها تكون طاقة وضع الشبيكة نهاية صغرى. [1]

على الجانب الآخر، تحتل ذرات الشوائب المتخللة، أحيانا، مواضع محددة دون إحداث تشوه في البلورة المضيفة. يمكن تسمية هذه المواضع طبقا للشكل المتعدد الأسطحالمتكون من التوصيل بين الذرات المضيفة التي تحيط بالذرة المتخللة. يبين الشكل كيف أن الذرات المتخللة، في البلورة المتمركزة الجسم، تحتل مركز شكل سداسي الأسطح (كما في الجزء (أ)) أو تحتل مركز شكل رباعي الأسطح كما في الجزء (ب)). يوفر أحد هذين الشكلين سداسي الأسطح أو رباعي الأسطح معظم الفراغ لكي تكمن فيه الذرة الشائبة. يعتمد نوع متعدد الأسطح المتكون على طاقة التفاعل بين الذرة الشائبة والذرات المضيفة اعتمادا أساسيا وبشكل حساس.



الشكل (2-3) الشوائب المتخللة في بلورة متمركزة الجسم.

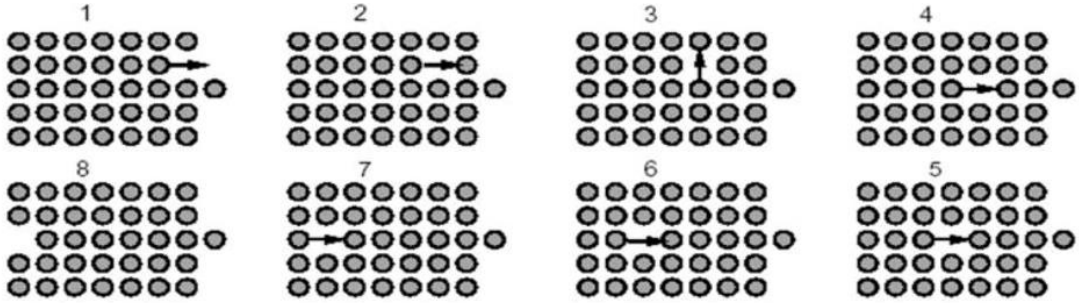
1 - العيوب النقطية في البلورات الأيونية Point defects in ionic crystals

تتكون الشوائب المتخللة والفراغات بشكل طبيعي في البلورات الأيونية كما تحدث في بلورات العناصر الصلبة. ومن ناحية أخرى، بسبب أن الكاتيونات والأنيونات في البلورات الأيونية تحمل شحنات كهربية، فإن عمليات تكون الفراغات أو التخللات هي عمليات غير مستقلة، نظرا لأن القوى الكولومية Columbic forces) بين الأيونات في هذه البلورات تكون كبيرة جدا. لذلك، لكي يتكون فراغ أنيون عن طريق تحريكه إلى السطح، مثلا، فإن السطح سوف تظهر علية

شحنة سالبة، بينما تظهر شحنة موجبة حول الفراغ المتكون داخل البلورة، وذلك للمحافظة على التعادل الكهربي للبلورة. يمكن تطبيق نفس المفهوم على فراغات كاتبون الذرة المتخللة ذاتيا. [7]

يكون تركيز الفراغات في المواد النقية صغيرا جدا حوالي فراغ لكل 10 ذرة) ويزداد هذا التركيز بارتفاع درجة الحرارة حوالي فراغ لكل 10 ذرة بالقرب من درجة الانصهار). تعتبر الفراغات مهمة لأنها تحكم معدل الانتشار أو الإحلال الذرى في الهيكل البنائي للمادة، بمعنى أن مقدرة الذرات على الحركة في الجسم الصلب يرجع، في المقام الأول إلى وجود الفراغات. تكون حركة الفراغ داخل المادة عن طريق الإزاحة والإحلال محل الذرات المجاورة. يبين الشكل 4-4 ديناميكية حركة الفراغ داخل بلورة جسم صلب ذو عبوة متراصة التبسيط المفهوم، يمكن تشبيه حركة الفراغ بحركة فراغ في جراج سيارات مزدحم.

يوجد نوعان من العيوب الفراغية في البلورات الأيونية هما عيب (Frenkel defect) وعيب فرنكل (Schottky defect) شوتكى فيما يلى سندرس بشيء من التفصيل كل نوع من هذه العيوب وذلك بقصد ترسيخ المفهوم وتسهيل المقارنة بينهما.

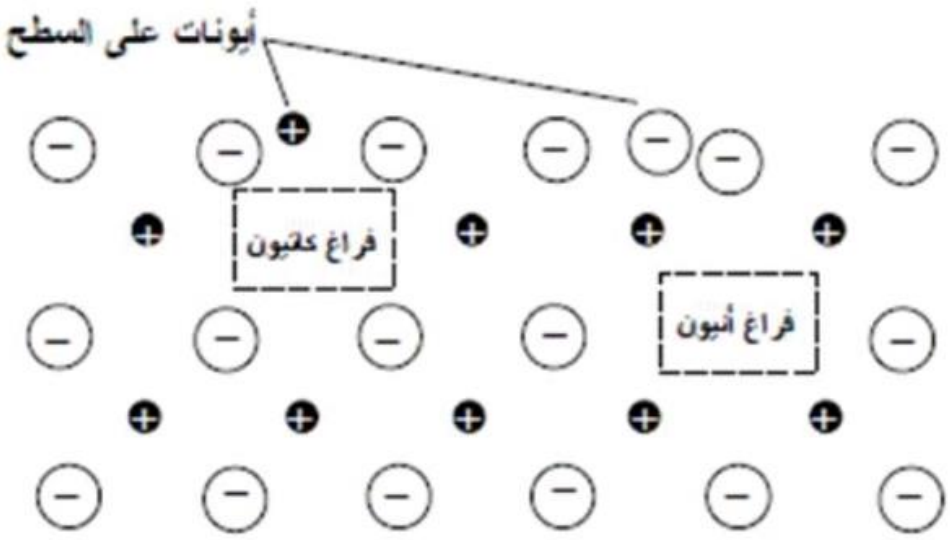


الشكل (2-4) ديناميكية حركة الفراغ داخل بلورة جسم صلب ذو عبوة متراصة.

2- فراغات شوتكي Schottky vacancies

يتكون فراغ شوتكي في المركبات الكيميائية ذات النظام البلوري الأيوني والذي يتطلب فيه اتزان الشحنة بين الأيونات المتجاورة. ينشأ فراغ شوتكى عندما تترك الذرة مكانها وتنتقل بخطوات

متتابعة حتى تستقر في النهاية على سطح البلورة تاركة خلفها مكان شاغرا، كما هو موضح في الشكل 4-5 وكنتيجة لذلك يتكون زوج من فراغات الأيونات إحداهما سالب الشحنة والأخر موجب الشحنة للحفاظ على هذا الاتزان . [9]



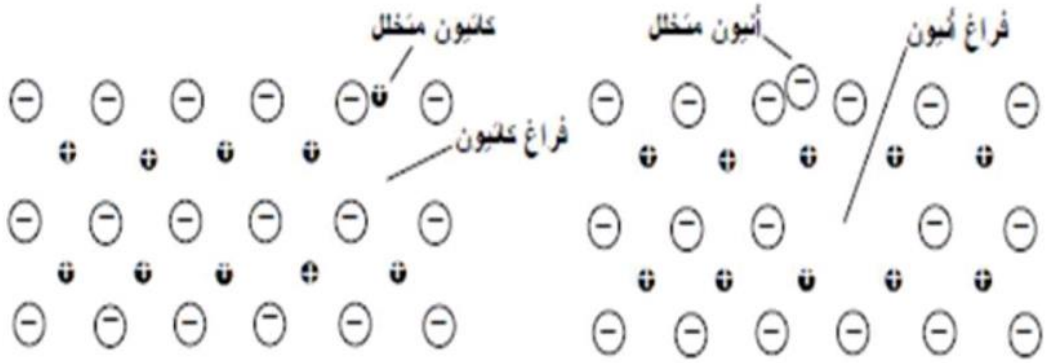
الشكل (2-5) انواع فراغات شوتكي

ونظرا لمخالفة شحنة الفراغ المتكون لشحنة الأيون الذي ترك مكانه وتحركه إلى السطح فإن ذلك يكافئ زوج من الايونات المختلفة الشحنة ولذلك يسمى عيب شوتكي ، أحيانا، بعيب الزوج الأيوني. يلعب هذا النوع من العيوب دورا كبيرا في تغير بعض الخصائص الفيزيائية للمادة وخاصية سرعة انتشار (diffusion) الذرات داخل البلورة.

3- فراغات فرنكل Frenkel vacancies

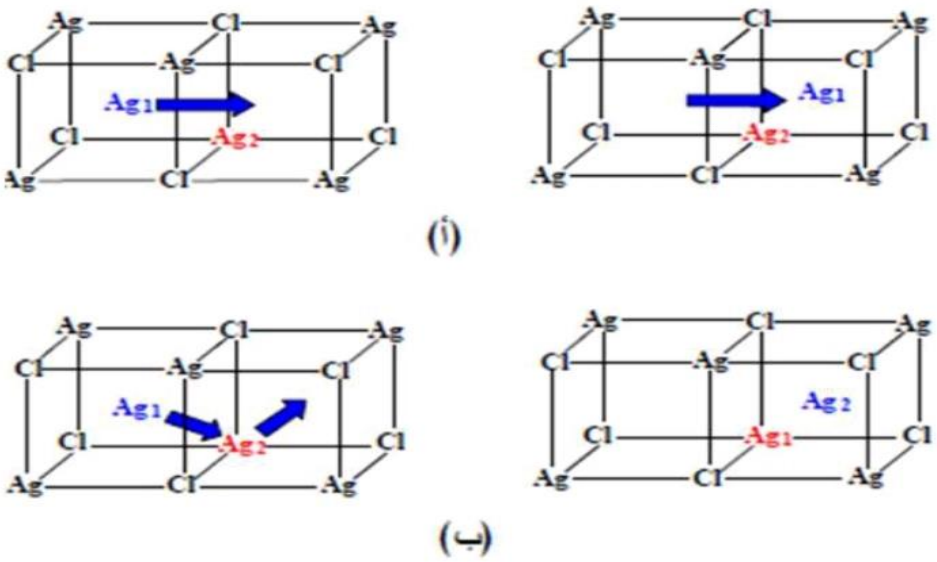
تنشأ عيوب فرنكل في المركبات الكيميائية ذات الرابطة الأيونية ويوجد نوعان من هذه العيوب تحدث في نفس الوقت النوع الأول هو أن تترك الذرة مكانها الطبيعي في الترتيب الدوري وتنحشر بين الذرات الأخرى، أي تستقر بين المستويات الذرية مكونة ذرة تخللية. بينما يكون النوع الثاني عبارة عن الفراغ الناتج عن ترك الذرة لمكانها في الترتيب. يحمل الفراغ المتكون دائما شحنة

مشابهه للشحنات المحيطة به، كما هو مبين في الشكل 4-6 يسمى عيب فرنكل أحيانا، بعيب الأيون المزاح. [3]



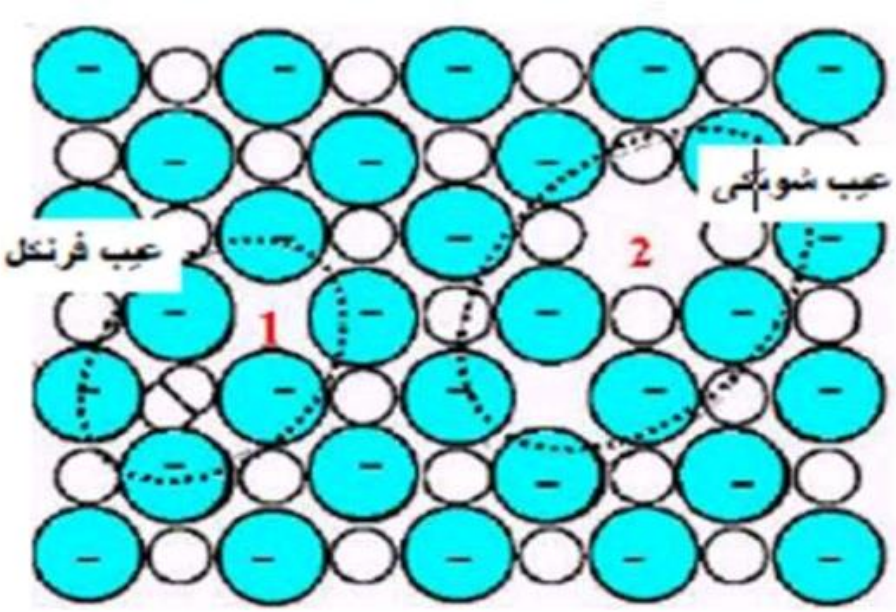
الشكل (2-6) أنواع فراغات فرنكل.

من الممكن أن يتحد الفراغ مع الذرة المتخللة ويختفي العيبان معا، كما إنه من الممكن أن يتحد فراغين لتكوين فراغ ثنائي (divacancy) وتكون حركته أسهل من الفراغ المفرد، كما يمكن أن يتجمع عدد كبير من الفراغات معا وينشأ عن ذلك فجوة. تتحرك عيوب فرنكل في البلورة الأيونية بأحد طريقتين بالقفز المباشر للذرة المتخللة كما هو مبين بالشكل 4-7 (1)، أو بميكانيكية التخلل، كما هو مبين في الشكل 2-7 (ب).



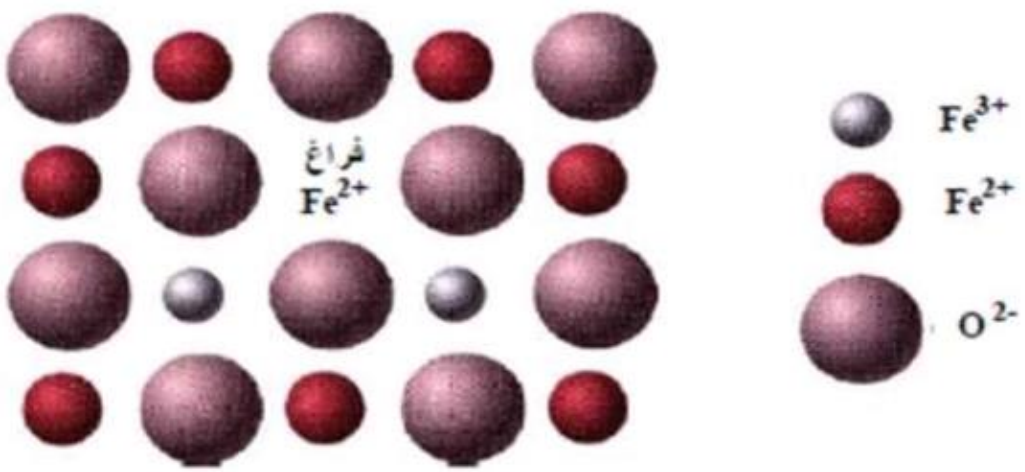
الشكل (2-7) حركة عيوب فرنكل في بلورة كلوريد الفضة

عادة تتكون الفراغات بالقرب من الأسطح الحرة (free surfaces) وبالقرب من حدود الحبيبات (grain boundaries) وأيضا بالقرب من الانخلاعات. يمكن المقارنة بين عيوب شوتكي وعيوب فرنكل بالرجوع إلى الشكل 2-8



الشكل 2-8 مقارنة بين عيوب شوتكي وفرنكل.

لا تغير عيوب شوتكي وفرنكل النسبة بين الأنيونات والكاتيونات في المواد الأيونية معروفة الصيغة الكيميائية (stoichiometric compounds)، بينما من الممكن أن تؤدى إلى تغيير التركيب الكيميائي في المواد غير المعروفة الصيغة الكيميائية (non-stoichiometric compounds) تحتوى المواد غير المعروفة الصيغة الكيميائية على عناصر انتقالية، مثل الحديد والذي يمكن أن يوجد على إحدى الحالتين: Fe أو Fe ولذلك فهي غير معروفة الصيغة الكيميائية. على سبيل المثال، في بلورة أكسيد الحديد FeO، يكون تكافؤ الحديد 2 فإذا تحول زوج من ايونات الحديد ذو تكافؤ 2 إلى حديد ذو تكافؤ 3- فإن ذلك يتطلب وجود فراغ للمحافظة على تعادل الشحنة، وبذلك يتغير التركيب الكيميائي،كما يتضح في الشكل 4-9 [10].



الشكل 2-9 تكون الفراغ في بلورة أكسيد الحديدوز.

4- أنواع أخرى من العيوب النقطية Other types of point defects

بالإضافة إلى الأنواع السابقة توجد أنواع أخرى من العيوب النقطية، حيث تترك ذرة أصلية مكانها في الترتيب المنتظم وتنحشر بين الذرات الأصلية الأخرى وتسمى في 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 فهي تتمفقط عند درجات الحرارة العالية أو عند التأثير على المادة الصلبة بشعاع من الطاقة مثل شعاع النيوترونات. [7]

2-3-2 العيوب الخطية LINE DEFECTS

يعتبر الانخلاع أكثر العيوب الخطية شيوعا. والانخلاع هو عبارة عن خط منتظم من الذرات التي غابت عن مكانها misplaced atoms) في الشبيكة البلورية. غالبا، يمتد هذا الخط مسافة كبيرة نسبيا داخل الشبيكة. يمكن تقسيم الانخلاعات إلى انخلاع الحافة و الإنخلاع اللولبي. سنشرح هذه الأنواع بشيء من التفصيل في الفصل التالي [7] .

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.

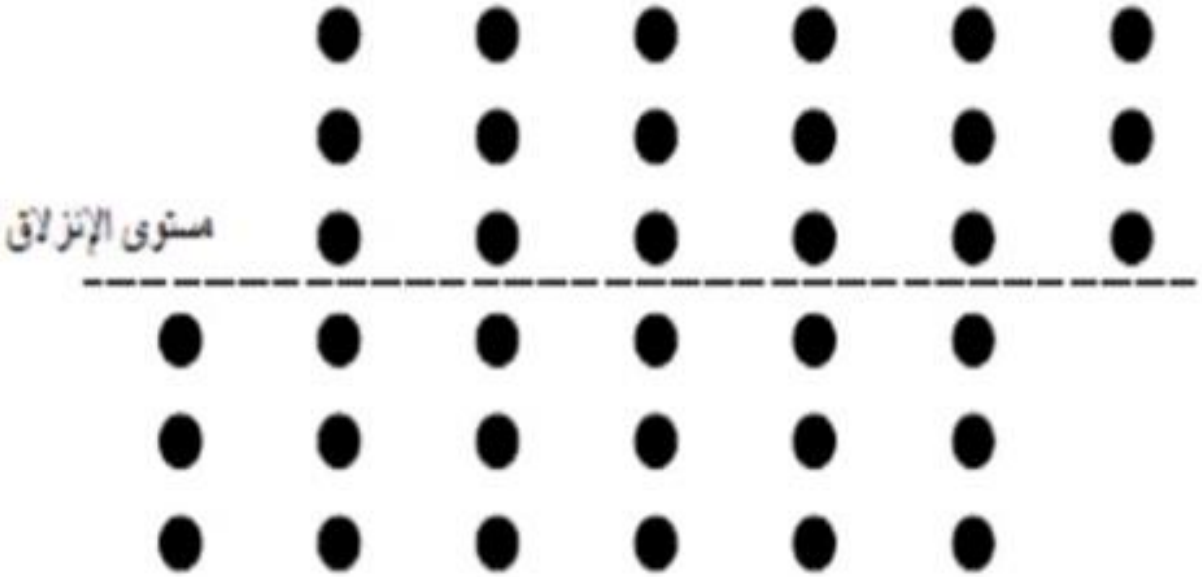
2- في تجارب تشتت الأشعة السينية وجد أن شدة الحيود في البلورات الحقيقية يختلف كثيرا عن شدة الحيود المحسوبة على أساس افتراض أن التركيب البلوري مثالي يتضمن عيوب خطية.

3- وجد أن بعض المحاليل الكيميائية تؤثر على مناطق معينة من سطح البلورة على صورة تأكل 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 خطي 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 ملموس العدد كبير من الذرات مكونا تشوها غير مرن يسمى بالانخلاع يبين الشكل 2-10 عملية انزلاق للمستويات البلورية بمقدار خطوة مقدارها ذرة واحدة. [4]

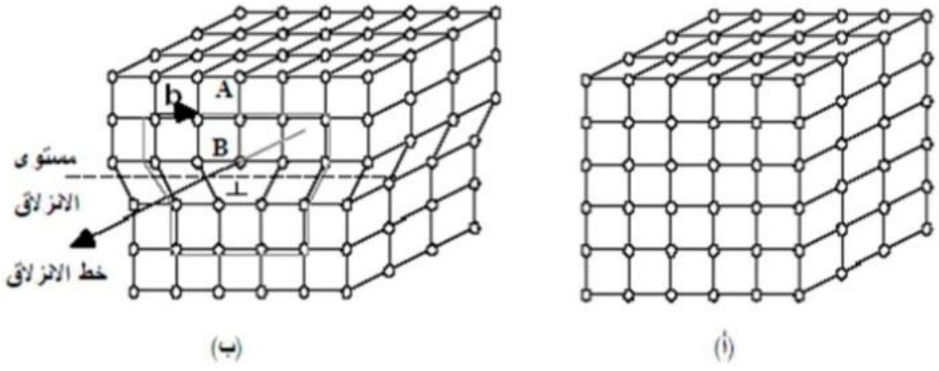


الشكل 2-10 عملية انزلاق للمستويات البلورية بمقدار ذرة واحدة.

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

1- انخلاع الحافة Edge dislocation

يجمع الشكل 2-11 رسم تخطيطي لبلورة غير مشوهه بمعنى لا تحتوى على عيوب (الجزء (أ)) وبلورة مشوهة يوجد بداخلها انخلاع حافة (الجزء (ب) من الشكل بقصد توضيح المفهوم وتسهيل المقارنة. [9]



الشكل 2-11 انخلاع الحافة داخل الشبيكة البلورية.

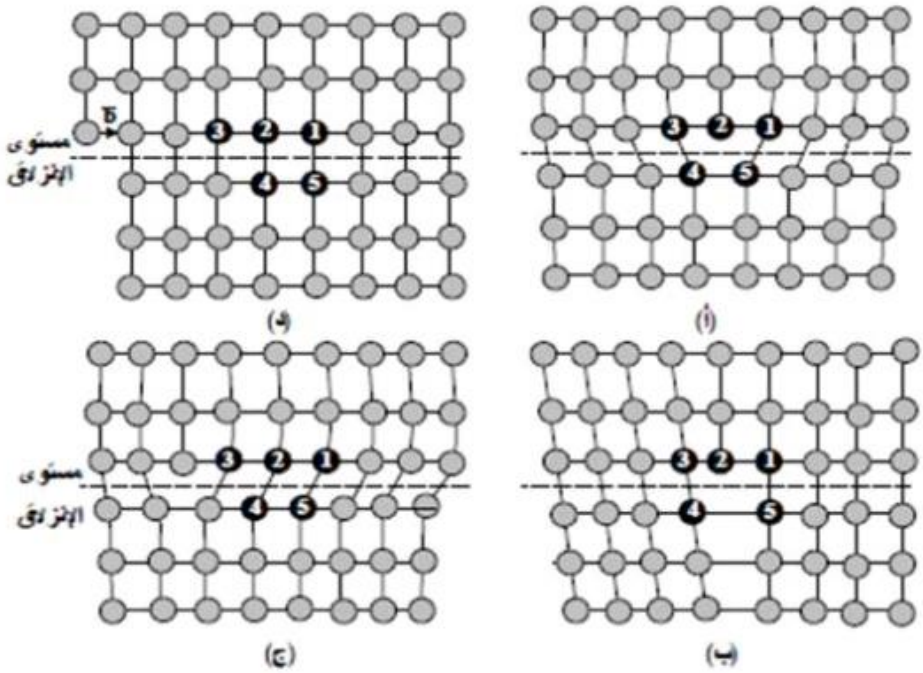
يمكن تفسير انخلاع الحافة على أساس أن هناك جزء من مستوى زائد محشور داخل البلورة الجزء AB في الشكل 2-11 (ب)). ينتج عن هذا الجزء تولد إجهاد ضغط على بعض مناطق

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 لانخلاع الحافة بالرمز .

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. [9]

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

يبين الشكل 2-12 حركة انخلاع حافة بمقدار خطوة واحدة وذلك عند التأثير عليا الانخلاع بإجهاد قص. تم تمييز 5 ذرات بلون أسود وذلك لسهولة تتبع حركة الإنخلاع من خلال سياق الأشكال من (أ) إلى (د). يسمى انخلاع الحافة أحيانا بالانخلاع الطرفي.

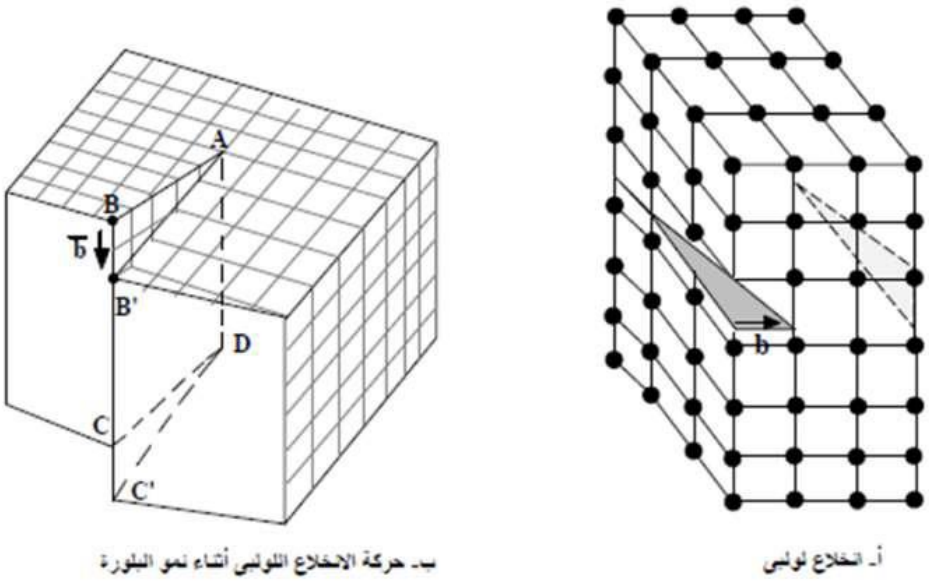


الشكل 2-12 سياق حركة انخلاع حافة عند التأثير عليه بإجهاد قص بمقدار خطوة واحدة .

2- الانخلاع 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 انخلاع الحافة كما يبين الشكل 2-13 (أ). بالإضافة إلى ما سبق، تكون الطاقة الناتجة من هذا الإنخلاع أكبر منها في حالة الإنخلاع الطرفي. [2]

بالرجوع إلى الشكل 2-13 (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 BA والتي تكونت من الانزلاق وجاءت تسمية هذا الانخلاع باللولبي من أنه إذا تحركنا من المستوى الذرى حول الانخلاع فإننا نجد أن المستوى يكون حلزوني ينشأ الإنخلاع اللولبي نتيجة تطبيق إجهاد قصي جزئي ويكون خط الإنخلاع موازيا لمتجه الخطوة. [2]



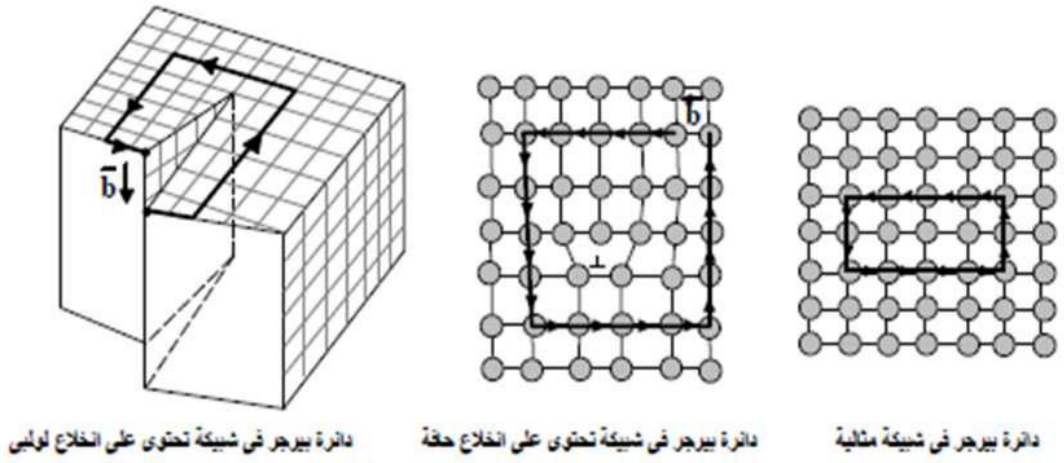
الشكل 2-13 الانخلاع اللولبي.

تتكون الانخلاعات 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 ويكون إنخلاعا.

3- متجه ودائرة بيرجر Burgers vector and circuit

يمكن وصف الإنخلاع سواء كان انخلاع حافة أو انخلاع لولبي بواسطة متجه إزاحة يسمى متجه بيرجر وهذا المتجه يغلق المسار الذي يحيط بخط الانخلاع والذي يسمى دائرة بيرجر (Burger circuit). وتتكون دائرة بيرجر عن طريق الانتقال خلال المنطقة ذات الترتيب المنتظم حول الانخلاع بخطوات عبارة عن مضاعفات صحيحة لمتجهات انتقال الشبيكة في الاتجاهات الأربعة. [6]

كما هو موضح في الشكل 2-14 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.



يلخص الشكل 2-14 خصائص دائرة ومتجه بيرجر في شبيكات بلورية مثالية (تامة) وأخريات تحتوى على انخلاعات.

2-3-3 العيوب المستوية Planer defects

العيوب المستوية هي العيوب الواقعة بين سطحين ، Interfacial). يمكن تصنيف العديد من أنواع الأسطح في المواد الصلبة إلى الفئات الآتية: [10]

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).

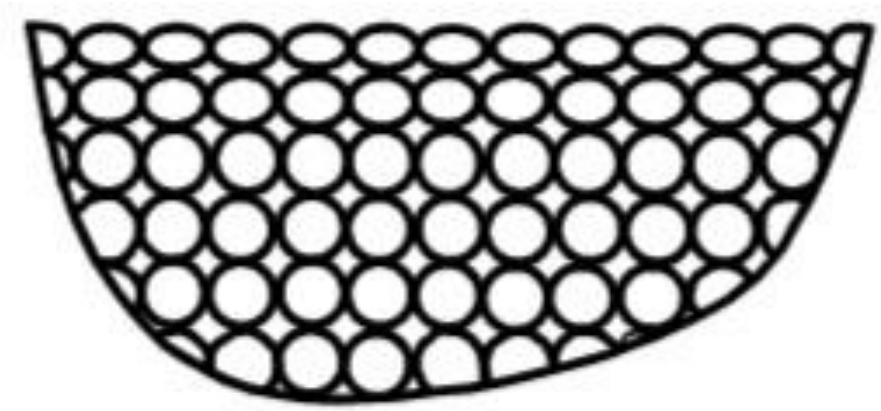
٤- الأسطح بين الأطوار المختلفة للمادة وتسمى حدود الطور (phase boundaries)، حيث يوجد بشكل عام، تغير في التركيب الكيميائي والترتيب الذرى عبر السطح بين الأطوار.

5- العيوب الناتجة عن أخطاء التعبئة (الرص).

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

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 2 – 15 [3]



الشكل 2–15 تصور مبسط للتشوه الذي يحدث عند سطح المادة المتبلورة.

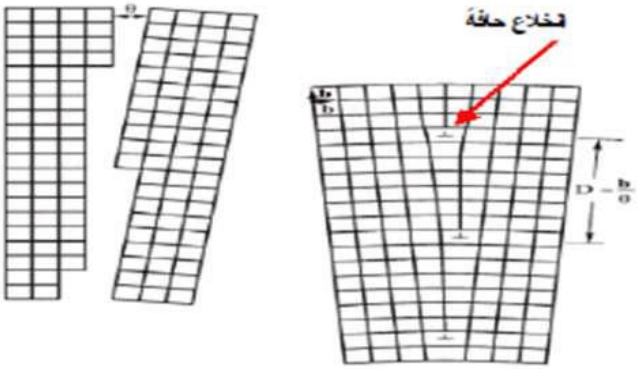
ربما تكون أهم سمة للأسطح الحرة هي طاقة السطح المصاحبة لأسطح أي جسم صلب يمكن رؤية مصدر طاقة السطح هذه باعتبار بيئة كل من الذرات على السطح والذرات الموجودة في الداخل. فمثلا، لكي يتم جلب ذرة من الداخل إلى السطح يجب إحداث كسر أو تشوه بعض الروابط وبذلك تزداد الطاقة. ويمكن تعريف طاقة السطح بأنها مقدار الزيادة في الطاقة لكل وحدة مساحة من السطح الجديد المتكون في المواد المتبلورة تعتمد طاقة السطحعلى 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. تتروح قيم طاقة السطح في المواد الصلبة من 10 جول/م إلى 1 جول/م. 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 امتزاز 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 امتزاز مختلف على السطح. [3]

2- حدود الحبيبة (Grain boundaries)

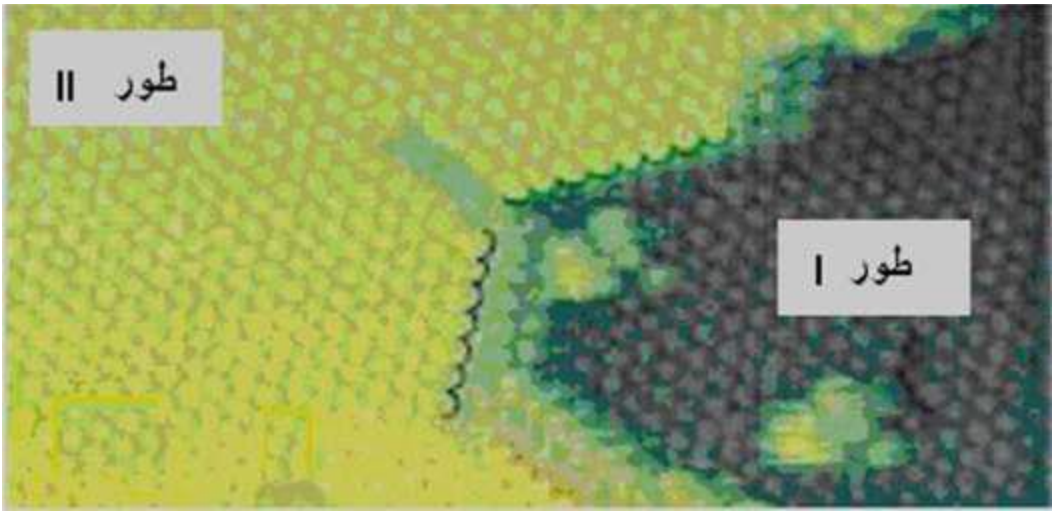
الحبيبة هي تجمع بلوري بحيث تكون جميع وحدات خلايا الحبيبة الواحدة منتظمة في نسق إتجاهي خاص بها ولها حدود خارجية (سطح) تفصلها عن الحبيبات المجاورة وهكذا فإن حدود الحبيبة تفصل بين مناطق ذات توجيه بلوري مختلف أبسط شكل الحدود الحبيبة يكون عبارة عن سطح بيني يتكون من صفوف متوازية من انخلاعات حافة.

يسمى هذا النوع الخاص من الحدود بالحد المائل وذلك لأن عدم التوجيه يكون في شكل ميل صغير على محور موازى للانخلاعات، كما يوضح الشكل 2-16 يكون التركيب الناتج مكافئ لانخلاعات حافة مفصولة بمسافة تساوى ، حيث هو طول متجه بيرجر و 6 هي زاوية ميل الإنخلاعات. يشار إلى الحد المائل بحد الزاوية المنخفضة عندما تكون زاوية عدم التوجيه أقل من10



الشكل 2-16 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 انخلاعات لأن المسافة الفاصلة بين الإنخلاعات سوف تصبح صغيرة، الأمر الذي معه تفقد الانخلاعات 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 فيحدود 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 2-17

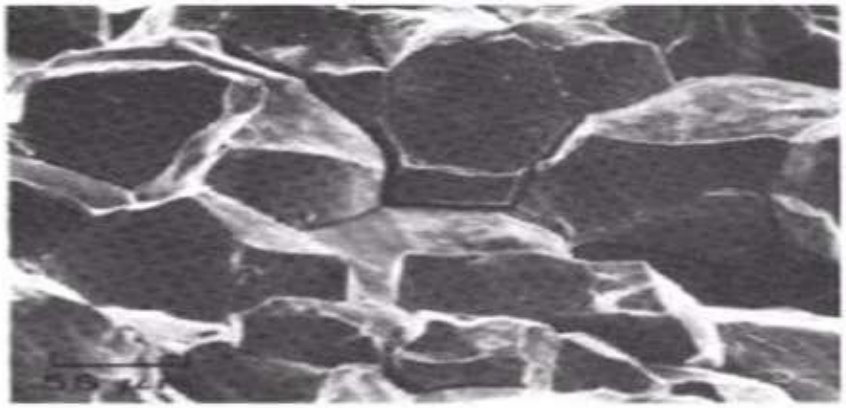


الشكل 2-17 سطح مكون بين طورين.

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 في شكل متعدد التبلور يبين

الشكل 4-18 صورة لسطح كسر فولاذ لا يصدأ مأخوذة بواسطة ميكروسكوب الكتروني ماسح يظهر وجود أطوار عديدة. [2]



الشكل 2-18

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 آخر 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. [2]

يؤثر التركيب البلوري والكيميائي على طبيعة الأسطح البينية للأطوار. عندما تكون الأطوار مختلفة في التركيب الكيميائي والبلوري فإن طبيعة السطح تكون شبيهه إلحد 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.

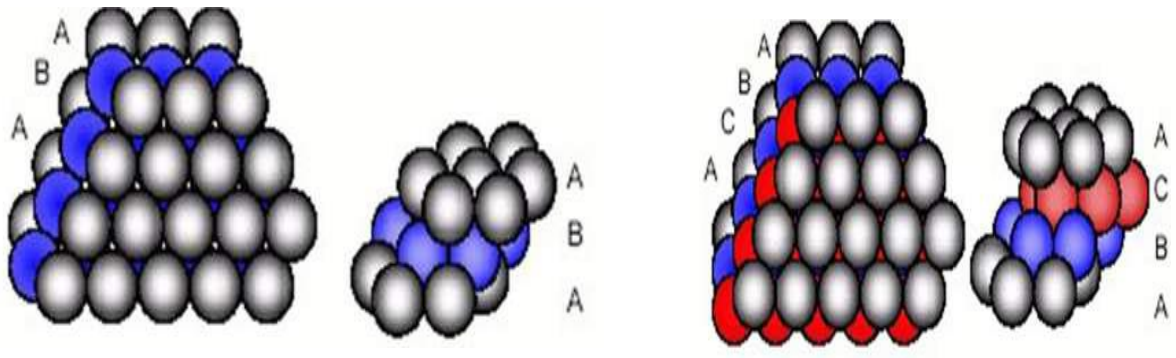
يؤدى مفهوم أن المادة تتركب من أطوار متصلة وأطوار متقطعة إلى تصنيف بسيط لمختلف أنواع المواد المركبة. يقدم الجدول 4-1 بعض الأمثلة مصنفة طبقا للتركيب البنائي مواد متبلورة أو مواد غير متبلورة وطبيعة كل طور . [1]

جدول2-1 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- عيوب الرص (التعبئة) Packing defects

بفرض أن البلورة عبارة عن رصات المستويات تتكون من ذرات بعضها فوق بعض وكان أحد المستويات مزاحا عن المستوى المجاور بإزاحة لا تساوى متجه في الشبيكة البلورية فإنه يتكون عيبا 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 بالشكل 2-19 عندما ينتج ترتيب ABABC مثلا بدلا من الترتيب ABCABC فإننا نقول أنه حدث خطاء في الرص. [5]



الشكل 2-19 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.

4-2 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 في حالة اتزان ديناميكي مع بخاره. سوف نعتبر فيما يلى تكون عيب شوتكي. من القانون الثاني للديناميكا الحرارية نجد أن إجمالي الطاقة الحرة للنظام (طاقة هولمولتز) يكون على الصورة، [9]

$$F = H - TS$$

حيث F هي الطاقة الحرة للنظام قيد الدراسة ، هو المحتوى الحراري (الانتالبي (enthalpy)

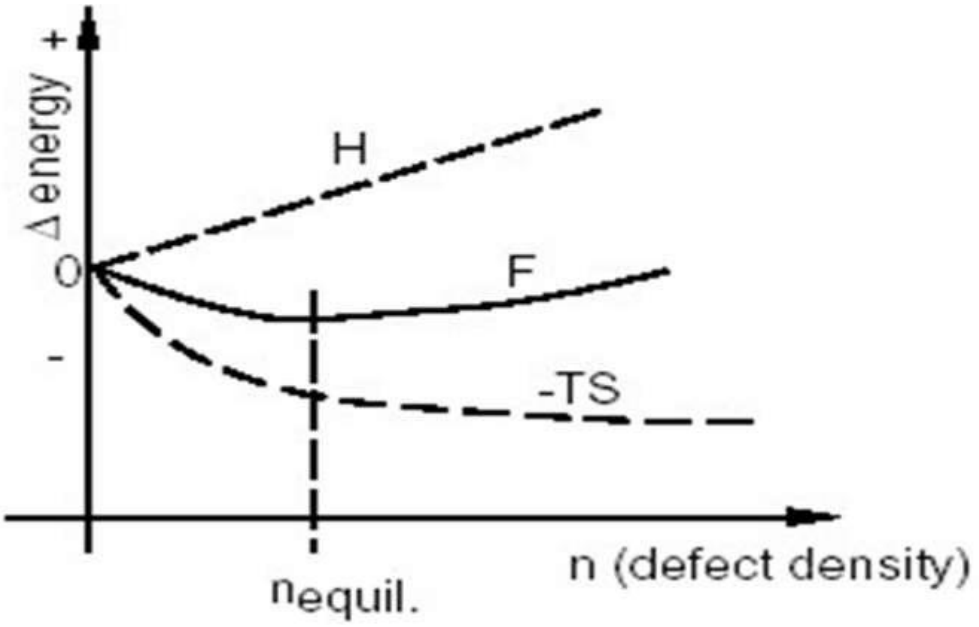
و 5 هو الأنتروبيا أو الفوضى (entropy) و 7 هي درجة الحرارة المطلقة.

إذا حدث التفاعل عند درجة الحرارة ، يحدث تغير في قيمة F مقداره D طبقا للتغير في DH ويكون التغير المحتمل في الأنتروبيا هو TDS هذه هي الحالة التي تصف تكون العيوب في الجسم الصلب التام طبقا لتوزيع الطاقة (ماكسويل – بولتزمان) فإنه يعتقد أن عددا من الذرات الفردية يمكن أن تكتسب طاقة حرارية تكون كافية لإزاحتها عن موضع الاتزان في الشبيكة إلى مكان بيني وتعتبر بمثابة عيب نقطي تحتاج عملية تكوين العيب النقطي هذه إلى طاقة وتؤدى إلى تكون إجهاد في الشبيكة وبالتالي إلى زيادة في المحتوى الحراري للنظام (D تكون موجبة وتزداد خطيا مع عدد العيوب المتكونة).

يؤدى الانحراف عن الكمال بتوليد العيوب النقطية إلى زيادة العشوائية أو الفوضى (Ds موجبة). يكون مقدار الفوضى المتولدة (D) كبيرا جدا خلال الخطوة الأولى من الكمال (التركيب المثالي في الاتجاه إلى إفساد ترتيب النظام، ولكن يتناقص مع تكون عدد معين من العيوب كلما ازدادت

الفوضى الكلية في النظام وبناء على ذلك فإن الحد TDs يتناقص بسرعة عند البداية ثم يميل إلى الثبات [10]

يبين الشكل 2−20 النتيجة النهائية، حيث تظهر الطاقة الحرة قيمة صغرى عند تكون عدد معين من العيوب في الجسم الصلب. تكون كثافة العيوب (1) عند الاتزان دالة في درجة الحرارة. وتخبرنا النهاية الصغرى للطاقة الحرة 7 أن التحول من الكمال إلى التركيب ذي العيوب (أي في اتجاه الفوضى عند الاتزان يحدث تلقائيا، أي بشكل طبيعي. تعتبر عملية تكون الفراغات الذرية في المواد الصلبة غير واضحة ومازالت ميكانيكية التكوين هدفا للأبحاث المكثفة.



الشكل 2−20 ديناميكية تكون العيوب النقطية في الجسم الصلب.

أظهرت حسابات الطاقة الحرارية المصاحبة للذرات في الشبيكة أن متوسط طاقة اهتزاز ذرات الشبيكة تكون أقل بكثير من 1 أقل كمية من الطاقة تلزم لتكون فراغ عند درجة حرارة الغرفة. ولهذا، فإن ذرة الشبيكة ستحتاج فقط إلى طاقة AH، وهي الطاقة اللازمة لتكون العيب أثناء حدوث تأرجح كبير في الطاقة. الاحتمال النسبي لأن يكون لذرة ما مقدار طاقة AH أعلى من طاقة المستوى الأرضي لها هو AHKT ، ، وحيث أنه يمكن تكوين فراغ عندما تكون طاقة الذرة مساوية لطاقة تكوين الفراغ، فإن احتمال تكون فراغ مكان الذرة هو نفس الاحتمال السابق. [4]

الفصل الثالث

فوائد العيوب البلورية

استخدامات العيوب البلورية

3-1 فوائد العيوب البلورية

3-1-1 تحسين الخواص الكهربائية في المواد

تُعد العيوب البلورية، وبالأخص العيوب النقطية الناتجة عن إدخال شوائب، من أهم العوامل التي ساهمت في تطور الإلكترونيات الحديثة. إذ تعتمد المواد شبه الموصلة مثل السيليكون والجرمانيوم على إضافة عناصر أخرى (عملية التطعيم Doping) من أجل تعديل خصائصها الكهربائية [12] .

فعند إدخال ذرات من عناصر خماسية التكافؤ مثل الفوسفور، يتم توليد إلكترونات حرة إضافية، مما يزيد من التوصيلية الكهربائية ويُنتج ما يُعرف بالنوع (n-type). في المقابل، عند إدخال عناصر ثلاثية التكافؤ مثل البورون، تتكون فجوات موجبة تُحسن حركة الشحنات، مكونة النوع (p-type) [13] .

ولا يقتصر دور هذه العيوب على زيادة التوصيل فقط، بل تتحكم أيضًا في سلوك الإلكترونات داخل المادة، مما يسمح بتصميم عناصر إلكترونية دقيقة مثل:

- الترانزستورات
- الدايودات
- الدوائر المتكاملة

وقد أكدت الدراسات أن البلورات النقية تمامًا تكون ضعيفة الاستخدام عمليًا، لأن غياب العيوب يجعل التحكم في خصائصها شبه مستحيل [14] .

3-1-2 زيادة مقاومة المواد وتحسين صلابتها

تلعب العيوب الخطية، وخاصة الانخلاعات(Dislocations) ، دورًا مهمًا في تحديد مقاومة المادة للتشوه. فعندما تتعرض المادة لإجهاد خارجي، تتحرك الانخلاعات داخل الشبكة البلورية، مما يؤدي إلى حدوث التشوه اللدن [15] .

لكن عند زيادة عدد العيوب أو وجود عوائق مثل حدود الحبيبات، يتم إعاقة حركة هذه الانخلاعات، مما يؤدي إلى زيادة مقاومة المادة. وهذه الظاهرة تُعرف بآلية "التقوية بالعيوب" [16] .

على سبيل المثال:

- المعادن ذات الحبيبات الدقيقة تكون أقوى من تلك ذات الحبيبات الكبيرة
- إضافة الشوائب يرفع من مقاومة الانزلاق

وتُستخدم هذه الفكرة في العديد من التطبيقات الصناعية، مثل تصنيع الفولاذ عالي المقاومة، حيث يتم التحكم في عدد ونوع العيوب للحصول على خواص ميكانيكية مثالية [12] .

3-1-3 تحسين قابلية التشكيل والتشوه اللدن

من الفوائد المهمة للعيوب البلورية أنها تمنح المواد القدرة على التشوه دون أن تتكسر بشكل مفاجئ. فالمواد المثالية الخالية من العيوب تكون غالبًا هشة جدًا، لأن الذرات فيها مرتبة بشكل منتظم للغاية، مما يجعل أي انزلاق صعب الحدوث [13] .

أما في وجود الانخلاعات، فإنها تعمل كمناطق ضعف نسبية تسمح بحركة الذرات تدريجيًا تحت تأثير الإجهاد، مما يؤدي إلى:

- سحب الأسلاك
- تشكيل الصفائح المعدنية
- عمليات الحدادة

وهذا يعني أن العيوب البلورية تجعل المواد أكثر "مرونة صناعيًا"، وهو أمر ضروري في التطبيقات الهندسية [14] .

3-1-4 تحسين الخصائص البصرية للمواد

تلعب العيوب البلورية دورًا مهمًا في تحديد الخصائص البصرية للمواد، خاصة في البلورات المستخدمة في التطبيقات الضوئية. فبعض العيوب تعمل كمراكز امتصاص أو انبعاث للضوء، مما يؤثر في لون المادة وسلوكها الضوئي [17] .

على سبيل المثال:

- اللون في بعض الأحجار الكريمة ناتج عن وجود شوائب
- الليزر يعتمد على مستويات طاقة محددة تنتجها العيوب

كما أن بعض البلورات يتم "هندستها" بإضافة عيوب محسوبة بدقة من أجل تحسين كفاءة الانبعاث الضوئي، وهو ما يُستخدم في:

- الليزرات
- الثنائيات الباعثة للضوء (LED)

وهذا يدل على أن العيوب ليست فقط مفيدة، بل أساسية في التكنولوجيا الضوئية الحديثة[16] .

3-1-5 تعزيز عمليات الانتشار داخل المواد

الانتشار هو عملية انتقال الذرات داخل المادة، وهو أمر أساسي في العديد من العمليات الصناعية مثل المعالجة الحرارية. وتلعب العيوب البلورية، خاصة الفجوات، دورًا مهمًا في تسهيل هذه العملية [16] .

فعند وجود فجوة في الشبكة البلورية، يمكن للذرات المجاورة أن تنتقل إليها بسهولة، مما يزيد من معدل الانتشار. وهذا يؤدي إلى:

- تحسين عمليات السبك
- تسريع التفاعلات داخل المواد
- تسهيل عمليات اللحام

وقد أثبتت الدراسات أن معدل الانتشار في المواد التي تحتوي على عيوب يكون أعلى بكثير مقارنة بالمواد المثالية[17] .

3-1-6 تحسين الخواص المغناطيسية

تؤثر العيوب البلورية أيضًا على الخواص المغناطيسية للمواد، حيث تعمل على تثبيت الجدران المغناطيسية(Domain Walls) ، مما يؤثر في سلوك المادة تحت تأثير المجال المغناطيسي [17] .

ويُستخدم هذا التأثير في:

- تصنيع أجهزة التخزين المغناطيسي
- تحسين أداء المواد المغناطيسية

كما أن التحكم في العيوب يسمح بضبط الاستجابة المغناطيسية للمادة، وهو أمر مهم في التطبيقات التكنولوجية الحديثة.

3-1-7 دور العيوب في المواد النانوية والتكنولوجيا الحديثة

في المواد النانوية، تصبح العيوب البلورية ذات أهمية أكبر، لأن نسبة سطح إلى حجم تكون عالية جدًا. وهذا يعني أن تأثير العيوب يكون مضاعفًا مقارنة بالمواد التقليدية [17] .

وتُستخدم العيوب في:

- تحسين التوصيل الكهربائي
- تعديل الخصائص الميكانيكية
- التحكم في التفاعلات الكيميائية

وقد أصبحت هندسة العيوب (Defect Engineering) مجالًا مهمًا في البحث العلمي، حيث يتم تصميم العيوب بشكل مقصود للحصول على خصائص محددة [14] .

3-2 استخدامات العيوب البلورية

3-2-1 استخدام العيوب البلورية في أشباه الموصلات

تُعد العيوب البلورية الأساس الذي تقوم عليه صناعة أشباه الموصلات، حيث يتم استغلال العيوب النقطية، وبالتحديد الشوائب، من أجل التحكم في الخصائص الكهربائية للمواد. فالسيليكون النقي، رغم أهميته، لا يمتلك توصيلية كافية لاستخدامه في الأجهزة الإلكترونية، ولذلك يتم إدخال شوائب محسوبة بدقة ضمن الشبكة البلورية [18] .

تؤدي هذه العملية، المعروفة بالتطعيم(Doping) ، إلى تكوين نوعين رئيسيين من أشباه الموصلات: النوع السالب (n-type) الذي يحتوي على إلكترونات حرة إضافية، والنوع الموجب (p-type)الذي يحتوي على فجوات موجبة [19].

ومن خلال دمج هذين النوعين، يتم تكوين الوصلة الثنائية(PN Junction) ، والتي تُعد الأساس في تصنيع:

- الثنائيات (Diodes)
- الترانزستورات
- الدوائر المتكاملة

وقد أظهرت الدراسات أن التحكم الدقيق في نوع وتركيز العيوب يسمح بضبط خصائص الأجهزة الإلكترونية بشكل كبير، مثل سرعة الاستجابة وكفاءة استهلاك الطاقة [20].

لذلك يمكن القول إن العيوب البلورية ليست مجرد عامل مساعد، بل هي عنصر جوهري في بناء التكنولوجيا الحديثة.

3-2-2 استخدام العيوب في تحسين الخواص الميكانيكية للمعادن

في المجال الصناعي، تُستخدم العيوب البلورية بشكل مقصود لتحسين الخواص الميكانيكية للمواد، وخاصة المعادن. حيث تعتمد العديد من تقنيات المعالجة الحرارية والميكانيكية على التحكم في عدد ونوع العيوب داخل الشبكة البلورية[12] .

فعلى سبيل المثال، عند إجراء عملية التشكيل على البارد، يزداد عدد الانخلاعات داخل المعدن، مما يؤدي إلى زيادة مقاومته للتشوه، وهي ظاهرة تُعرف بالتقسية بالتشوه (Work Hardening) [18] .

كما أن تقليل حجم الحبيبات يؤدي إلى زيادة عدد حدود الحبيبات، والتي تعمل كحواجز أمام حركة الانخلاعات، مما يزيد من صلابة المادة.

وتُستخدم هذه المبادئ في تصنيع:

- الفولاذ عالي المقاومة
- سبائك الألمنيوم
- المواد المستخدمة في الطائرات والسيارات

وقد أثبتت الأبحاث أن التحكم في العيوب البلورية يسمح بتحقيق توازن بين الصلابة والمرونة، وهو أمر بالغ الأهمية في التطبيقات الهندسية[21] .

3-2-3 استخدام العيوب البلورية في الخلايا الشمسية

تلعب العيوب البلورية دورًا مزدوجًا في الخلايا الشمسية، حيث يمكن أن تكون مفيدة أو ضارة حسب نوعها وتركيزها. فمن جهة، تُستخدم بعض العيوب لتحسين امتصاص الضوء وزيادة عدد الإلكترونات المتولدة، مما يؤدي إلى رفع كفاءة تحويل الطاقة[22] .

ومن جهة أخرى، قد تعمل بعض العيوب كمراكز لإعادة اتحاد الإلكترونات والفجوات، مما يقلل من كفاءة الخلية. لذلك، تعتمد صناعة الخلايا الشمسية الحديثة على ما يُعرف بـ"هندسة العيوب"، حيث يتم التحكم في نوع العيوب ومواقعها داخل المادة[19] .

وقد أظهرت الدراسات أن إدخال عيوب محسوبة بدقة يمكن أن يحسن الأداء العام للخلايا الشمسية، خاصة في المواد الحديثة مثل:

- السيليكون متعدد البلورات
- المواد النانوية

وهذا يوضح أن العيوب ليست فقط تحديًا، بل أداة يمكن استخدامها لزيادة كفاءة الطاقة المتجددة [20] .

3-2-4 استخدام العيوب في المواد البصرية والليزر

تُستخدم العيوب البلورية بشكل واسع في تصنيع المواد البصرية، حيث تؤثر بشكل مباشر في امتصاص وانبعاث الضوء. ففي بعض البلورات، تعمل العيوب كمراكز طاقة تسمح بانتقال الإلكترونات بين مستويات طاقة مختلفة، مما يؤدي إلى إصدار الضوء [23] .

ويُعد الليزر من أهم التطبيقات التي تعتمد على العيوب البلورية، حيث يتم إدخال شوائب معينة داخل البلورة (مثل الياقوت الصناعي) لتكوين مستويات طاقة مناسبة لإنتاج شعاع ليزر متماسك [18] .

كما تُستخدم العيوب في:

- الثنائيات الباعثة للضوء (LED)
- الألياف الضوئية
- الأجهزة الطبية البصرية

وقد أثبتت الأبحاث أن التحكم في نوع العيوب وتركيزها يمكن أن يحسن من شدة الضوء المنبعث وكفاءته، مما يجعلها عنصرًا أساسيًا في التكنولوجيا الضوئية [22] .

3-2-5 استخدام العيوب في المواد المغناطيسية

تلعب العيوب البلورية دورًا مهمًا في تحديد الخصائص المغناطيسية للمواد، حيث تؤثر في حركة الجدران المغناطيسية داخل المادة. فعند وجود عيوب، يتم تثبيت هذه الجدران، مما يؤثر على استجابة المادة للمجال المغناطيسي [23] .

ويُستخدم هذا التأثير في:

- تصنيع أجهزة التخزين المغناطيسي (مثل الأقراص الصلبة)
- تحسين أداء المحولات الكهربائية
- تطوير المواد المغناطيسية الحديثة

كما أن التحكم في العيوب يسمح بتعديل الخصائص المغناطيسية، مثل شدة المغنطة وقابلية الاستجابة، وهو أمر مهم في التطبيقات الصناعية والتكنولوجية[18] .

3-2-6 استخدام العيوب في المواد النانوية

في علم المواد النانوية، تزداد أهمية العيوب البلورية بشكل كبير بسبب صغر حجم المادة. إذ تؤثر العيوب بشكل مباشر في الخصائص الفيزيائية والكيميائية، نظرًا لأن نسبة السطح إلى الحجم تكون عالية جدًا [20] .

وتُستخدم العيوب في:

- تحسين التوصيل الكهربائي
- زيادة النشاط الكيميائي
- تعديل الخصائص الميكانيكية

وقد ظهر مجال حديث يُعرف بـ"هندسة العيوب"، حيث يتم تصميم العيوب بشكل مقصود للحصول على خصائص محددة، مثل زيادة كفاءة الحفازات أو تحسين أداء الأجهزة الإلكترونية النانوية[19] .

3-2-7 استخدام العيوب في عمليات الانتشار والمعالجة الحرارية

تلعب العيوب البلورية دورًا أساسيًا في عمليات الانتشار داخل المواد، حيث تُعد الفجوات والانخلاعات مسارات سهلة لحركة الذرات. وهذا الأمر يُستغل في العديد من العمليات الصناعية مثل المعالجة الحرارية [21] .

فعند تسخين المادة، تزداد حركة الذرات، وتُسهل العيوب انتقالها، مما يؤدي إلى:

- تحسين توزيع العناصر داخل السبيكة
- إزالة الإجهادات الداخلية
- تحسين الخواص الميكانيكية

وقد أظهرت الدراسات أن المواد التي تحتوي على عيوب مدروسة تكون أكثر قابلية للمعالجة الحرارية وأكثر استجابة للتغيرات في درجة الحرارة [18] .

الخاتمة

في ختام هذا البحث، يمكن التأكيد على أن العيوب البلورية لم تعد تُعتبر مجرد خلل في البناء الداخلي للمواد، بل أصبحت عنصرًا أساسيًا في فهم سلوك المواد وتطوير خصائصها. فقد أثبتت الدراسة أن وجود هذه العيوب، سواء كانت نقطية أو خطية أو مستوية، له تأثير عميق على الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية.

كما أن التقدم العلمي والتكنولوجي مكّن الباحثين من التحكم في هذه العيوب واستغلالها فيما يُعرف بـ"هندسة العيوب"، مما فتح آفاقًا واسعة في مجالات متعددة مثل الإلكترونيات، والطاقة، والمواد النانوية، والهندسة الصناعية.

وعليه، فإن دراسة العيوب البلورية لا تقتصر على الجانب النظري فقط، بل تمتد لتشكل أساسًا لتطوير مواد جديدة ذات كفاءة عالية تلبي متطلبات التكنولوجيا الحديثة. ومن المتوقع أن يستمر هذا المجال في التطور، خاصة مع التوجه نحو تصميم مواد ذكية ومتقدمة تعتمد بشكل أساسي على التحكم الدقيق في بنيتها البلورية.

النتائج

من خلال الدراسة والتحليل، يمكن تلخيص أهم النتائج التي تم التوصل إليها فيما يلي:

1. استحالة الحصول على بلورة مثالية بالكامل، إذ تحتوي جميع المواد الصلبة على عيوب بدرجات متفاوتة .
2. العيوب النقطية تؤثر بشكل مباشر في الخصائص الكهربائية وعمليات الانتشار داخل المواد .
3. الانخلاعات (العيوب الخطية) تلعب دورًا أساسيًا في تحديد سلوك المواد تحت الإجهاد، وتتحكم في التشوه اللدن .
4. العيوب المستوية مثل حدود الحبيبات تؤثر بشكل كبير في مقاومة المواد وصلابتها .

5. وجود العيوب يمكن أن يحسن الخواص الفيزيائية بدلًا من إضعافها، خاصة عند التحكم بها بشكل مدروس .
6. تعتمد أشباه الموصلات بشكل أساسي على العيوب (التطعيم) للتحكم في التوصيلية الكهربائية .
7. العيوب البلورية تساهم في تحسين الأداء الصناعي للمواد مثل زيادة الصلابة، تحسين التشكيل، وتسريع عمليات الانتشار .
8. للعيوب دور مهم في التطبيقات البصرية والمغناطيسية مثل الليزر ووسائط التخزين .
9. في المواد النانوية، يصبح تأثير العيوب أكثر أهمية بسبب صغر الحجم وزيادة نسبة السطح .
10. أصبح التحكم في العيوب (هندسة العيوب) مجالًا حديثًا مهمًا في تطوير المواد المتقدمة .

المصادر

المصادر

القران الكريم

1. "Crystal", www.britannica.com, Retrieved 5-8-2019. Edited.
2. "Crystal: Definition, Types, Structure & Properties", study.com, Retrieved 5-8-2019. Edited.
3. Crystal Healing: Stone-Cold Facts About Gemstone Treatments", www.livescience.com, Retrieved. Lieb Klaus-Peter Keinonen Juhani
4. (2006) Luminescence of ion-irradiated a quartz". Contemporary Physics..
5. Waldmann T. (2012). "The role of surface defects in large organic molecule adsorption: substrate configuration effects". Physical Chemistry Chemical Physics.
6. Properties and interactions of atomic defects in metals and alloys, volume 25 of Landolt-Börnstein, New Series III, chapter 2, p. 88،
7. Kendrew J. C. Bodo G. Dintzis H. M. Parrish. R. G. Wyckoff H. Phillips D. C. (1958). "A Three-Dimensional Model of the Myoglobin Molecule Obtained by X-Ray Analysis". Nature. doi:10.1038/181662a0. PMID 13517261.
8. Prince E. (2006). International Tables for Crystallography Vol. C: Mathematical, Physical and Chemical Tables. Wiley. ISBN 978-1-4020-4969-9.
9. UN announcement "International Year of Crystallography". iycr2014.org. 12 July 2012
10. Will Kleber, Hans-Joachim Bautsch und Joachim Bohm (1990): Einführung in die Kristallographie. Verlag Technik.

11. Siegfried Haussühl (1993): Kristallgeometrie. Weinheim Verlag.
12. Callister, W. D. & Rethwisch, D. G., *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 9th Edition, Wiley, 2014.
13. Askeland, D. R. & Wright, W. J., *The Science and Engineering of Materials*, 7th Edition, Cengage Learning, 2015.
14. Shackelford, J. F., *Introduction to Materials Science for Engineers*, 8th Edition, Pearson, 2016.
15. Van Vlack, L. H., *Elements of Materials Science and Engineering*, Addison-Wesley, 1989.
16. Dieter, G. E., *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, 1986.
17. Kittel, C., *Introduction to Solid State Physics*, 8th Edition, Wiley, 2005.
18. Sze, S. M. & Ng, K. K., *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd Edition, Wiley, 2007.
19. Streetman, B. G. & Banerjee, S., *Solid State Electronic Devices*, 7th Edition, Pearson, 2015.
20. Kittel, C., *Introduction to Solid State Physics*, 8th Edition, Wiley, 2005.
21. Ashby, M. F. & Jones, D. R. H., *Engineering Materials 1*, Butterworth-Heinemann, 2012.
22. Hull, D. & Bacon, D. J., *Introduction to Dislocations*, 5th Edition, Butterworth-Heinemann, 2011.
23. إلكترونية علمية. (FasterCapital – Arab Sciencepedia – 3rabica).