الباب الأول

مقدمة عن المواد الهندسية

Introduction to Engineering Materials

الفصل الأول
المواد الهندسية

مقدمة:

من المعروف أن المواد هي التي تكون الكيان الأساسي للأعمال الهندسية المختلفة من ماكينات ومنتجات ومباني وكباري....إلخ. لذا فالمهندس مع إختلاف تخصصه وإختلاف العمل الذي يقوم به لا بد له من التعامل مع المواد في جميع خطوات عمله لإنشاء العمل الهندسي والمحافظة عليه لكي يؤدي دوره كمهندس بالقدر المرجو.

يهدف المهندس أساسا عند إختيار خامة ما إلى أن تتطابق خواص تلك الخامة مع متطلبات تصنيع الجزء المراد إنتاجه وكذلك مع متطلبات إستعمال هذا الجزء فيما بعد.

تصنيف المواد الهندسية:

هنالك مداخل كثيرة لتصنيف وتقسيم المواد الهندسية، وبصورة عامة يمكن تقسيمها إلى قسمين رئيسيين:

المواد المعدنية: Metallic materials

وهي التي تدخل المعادن في تركيبها بنسب كبيرة، وتصنف إلى قسمين:

1. معادن حديدية Ferrous metals وهي التي يدخل الحديد كعنصر أساسي في تركيبها ومن أمثلتها الفولاذ (الصلب الكربوني) Carbon Steel والصلب السبائكي Alloy Steel والحديد الزهر Cast Iron.
2. معادن غير حديدية Non-Ferrous metals وتنقسم إلى:
   - معادن ثقيلة Heavy metals مثل النحاس Copper والنيكل Nickel.
   - معادن خفيفة Light metals مثل الألمنيوم Aluminum والمغنيسيوم Magnesium.
   - معادن طرية Soft metals مثل الرصاص Lead والقصدير Tin.

المواد الغير معدنية: Non-Metallic materials

وهي عبارة عن مواد لا يدخل المعدن في تركيبها بشكل أساسي ويمكن تصنيفها إلى ثلاث مجموعات رئيسية:

1. البوليمر: Polymer

وهي عبارة عن مركبات هيدروكربونية ذات سلاسل وتنقسم إلى قسمين:

i المطاط الطبيعي: Natural Rubber

ويتم الحصول عليه من الأشجار وهو ذو قيمة هندسية بسيطة وذلك للزوجته الشديدة في درجة الحرارة العادية وكذلك له مقاومة شد ضعيفة، لكن عندما تدعيمه مع مواد أخرى (مثل الكربون والأسلاك المعدنية) ويعالج بالكبريت عند درجات حرارة عالية تزداد مطيليته ومتانته.

ii اللدائن (البلاستيك): Plastic

وهي عبارة عن مواد متبلمرة صناعيا يتم الحصول عليها بتفاعل يعرف بالبلمرة وتوجد في أشكال مختلفة كالطلاء ومواد التغليف وهياكل المنتجات. وتنقسم اللدائن إلى نوعين:

- اللدائن الحرارية. Thermoplastic
- اللدائن التي تتصلد بالحرارة. Thermosetting

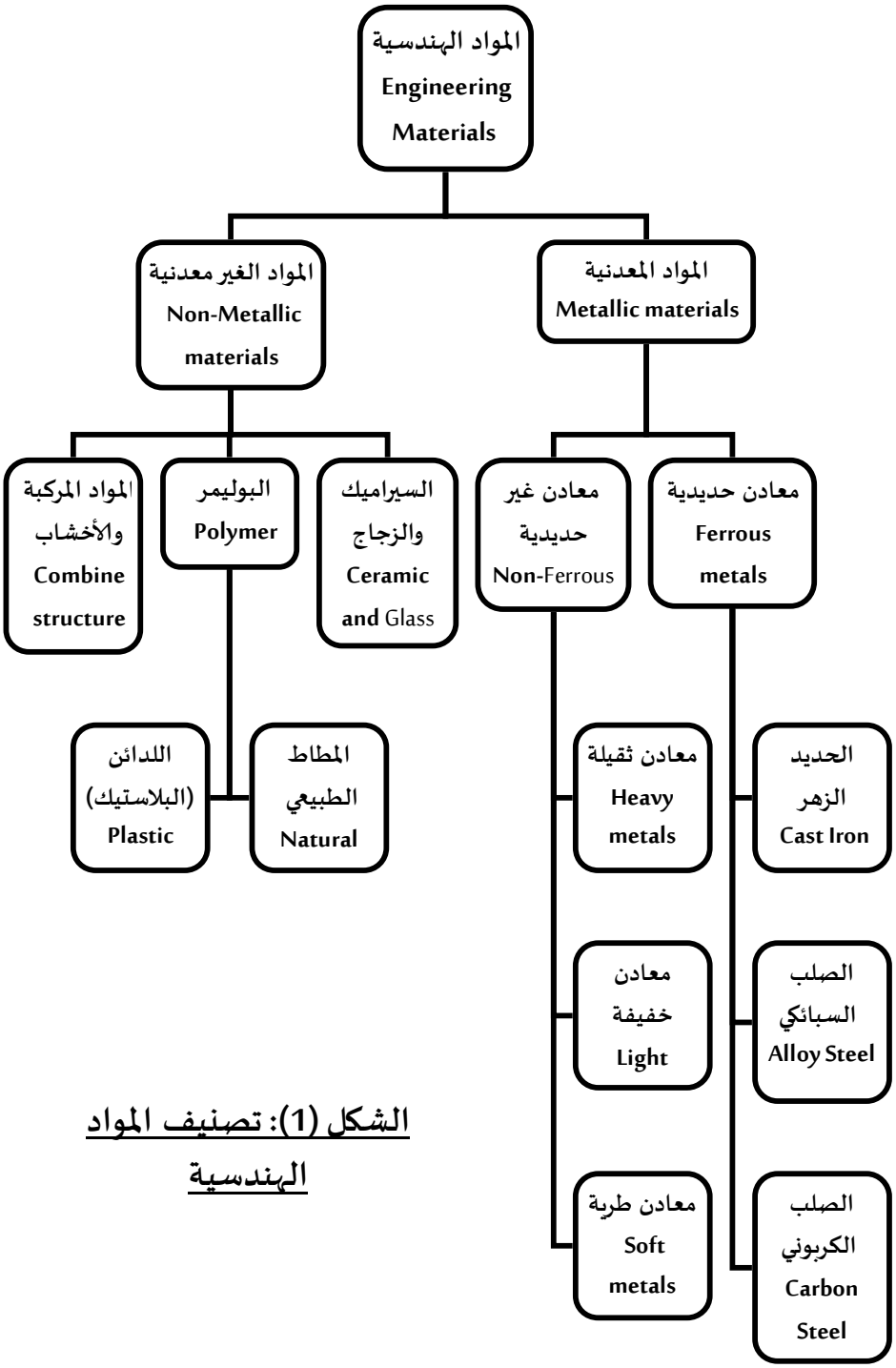
2. السيراميك والزجاج: Ceramic and Glass

كلمة سيراميك تعني الفخار أو الخزف وهي المواد المستخلصة من الطين أو التربة والتي حولت إلى منتجات مفيدة بعد تعريضها لدرجات حرارة عالية لفترات زمنية معينة أثناء الإنتاج. بالإضافة للطين ومنتجاته هنالك منتجات سيراميكية شائعة الإستعمال مثل الزجاج والجبص والجير والأسمنت، حيث تستخرج من باطن الأرض وتعرض لدرجات الحرارة العالية.

3. المواد المركبة والأخشاب: Combine structure and Wood

في بعض الأحيان تكون المادة المفردة ليست مناسبة لتفي بمتطلبات التصميم ولكن عندما تركب مع مادة أخرى فإنها تعطي حلا مقبولا للمشكلة الهندسية. وتعرف هذه المواد المكونة من مادتين فأكثر بالمواد المركبة أو المدعمة. وتعتبر الأخشاب من المواد المركبة والتي لها بنية تركيبية معقدة، والأخشاب المستخدمة في الصناعة نوعان:

- الأخشاب الطرية Soft wood وهي الأخشاب من الفصيلة الصنوبرية مثل الصنوبر والخشب الأحمر وتستخدم في صناعة الورق.
- الأخشاب الصلبة Hard wood مثل الصفصاف والمهوقني والزان.



الشكل (1): تصنيف المواد الهندسية

اختيار المواد الهندسية:

يقصد بإختيار المواد الهندسية قياس مدى صلاحية المادة للإستعمال في الأغراض المعينة (إظهار وتأكيد مدى إحتمال المادة الهندسية لظروف عمل المنتج). وهنالك عدة عوامل تأخذ في الأعتبار عند إختيار المواد الهندسية منها:

1. أنواع المواد المتوفرة ويمكن الحصول عليها (تكلفة التحصل على المادة).
2. الخواص المختلفة لهذه المواد (ميكانيكية – فيزيائية – كيميائية).
3. الإستعمال المطلوب من المادة (ظروف عمل المنتج).
4. طرق تحضير وتصنيع المواد المختلفة أو المنتجات وتأثير هذه الطرق على الخواص.
5. طرق الإختبار والفحص ومدى دلالتها على تقدير وقياس الخواص المطلوبة.

خواص المواد الهندسية:

هي اللغة التي يوضح بها المصمم إحتياجاته للمادة التي ستقاوم ظروف العمل من أحمال ودرجات حرارة ورطوبة وتفاعلات كيميائية.. الخ. ويمكن تقسيم خواص المواد إلى:

- **خواص طبيعية (فيزيائية):**

مثل الأبعاد والشكل والكثافة والوزن النوعي والمسامية والبنية المرئية بالعين المجردة والبنية الدقيقة.

- **خواص كيميائية:**

مثل التركيب الكيميائي والحمضية أو القلوية ومقاومة التآكل (الصدأ) والتقلبات الجوية.

- **خواص بصرية:**

مثل اللون ونفاذ الضوء وانعكاس الضوء.

- **خواص فيزوكيميائية:**

مثل مدى امتصاص الماء والسوائل الأخرى والانكماش والتمدد نتيجة لاختلاف درجة الرطوبة.

- **خواص حرارية:**

مثل التمدد والتوصيل الحراري والحرارة النوعية.

- **خواص سمعية:**

مثل التوصيل الصوتي والانعكاس الصوتي.

- **خواص كهرومغناطيسية:**

مثل التوصيل والنفاذ المغناطيسي والكهربي و الفعل الجلفاني.

- **خواص ميكانيكية:**

مثل المتانة و الصلادة والمرونة والمطيلية والطروقية والقصافة ومقاومة الكلال ومقاومة الزحف.

<u>الخواص الميكانيكية للمواد الهندسية:</u>

تعرف الخواص الميكانيكية بأنها الخواص التي تتعلق بسلوك المادة (مقاومة أو تغيرات ...ألخ) عندما تتعرض للأحمال المؤثرة في مراحل التصنيع أو الإستعمال سواء كانت هذه الأحمال إستاتيكية أو ديناميكية أو متكررة.

الحمل الأستاتيكي :Static loading

هو الذي يكون فيه تأثير الحمل بطيئاويزداد تدريجيا حتى يصل قيمته القصوى بدون إحداث أي صدم أو إهتزاز.

الحمل الديناميكي :Dynamic loading

هو الذي يكون في شكل صدمة أو إهتزاز مفاجأ.

التحميل المتكرر (الدوري) :Repeated (Cyclic) loading

وهو الذي تتعرض فيه القطعة الهندسية لتحميل متكرر يزيد وينقص في قيمته.

ومن الخواص الميكانيكية على سبيل المثال:

المتانة: Toughness وهي قدرة المادة على إمتصاص الطاقة خلال تحميلها حتى الكسر.

المطيلية: Ductility وهي قدرة المادة على تحمل التشكيل تحت تأثير إجهاد الشد دون حدوث تمزق كما في عملية سحب الأسلاك.

الطروقية: Malleability وهي قدرة المادة على تحمل التشكيل تحت الضغط دون حدوث تمزق كما في عملية الحدادة والدرفلة.

الصلادة: Hardness هي قدرة المادة على مقاومة الخدش والإختراق بواسطة الأجسام ألأخرى.

المرونة: Elasticity هي قابلة المادة للتشكيل (تغير الشكل) تحت تأثير القوى الخارجية ثم استرجاع شكلها الابتدائي عندما تزول القوى والأحمال التي تأثرت بها.

اللدونة: Plasticity هي قابلة المادة للتشكيل (تغير الشكل) تحت تأثير القوى الخارجية ثم ثبوت الشكل والأبعاد التي حدثت عندما تزول القوى والأحمال التي تأثرت بها.

اختبارات المواد الهندسية:

كل الخواص الميكانيكية السابقة والخواص الأخرى تحدد لها قيم ومقاييس وذلك بواسطة إجراء إختبارات مثل:

- إختبارات الشد.
- إختبارات الصلادة.
- اختبارات الصدم.
- اختبارات الكلال.
- اختبارات الزحف.

الفصل الثاني
اختبارات الخواص الميكانيكية
Mechanical Properties Tests

أهمية إجراء الاختبارات الميكانيكية للمعادن:

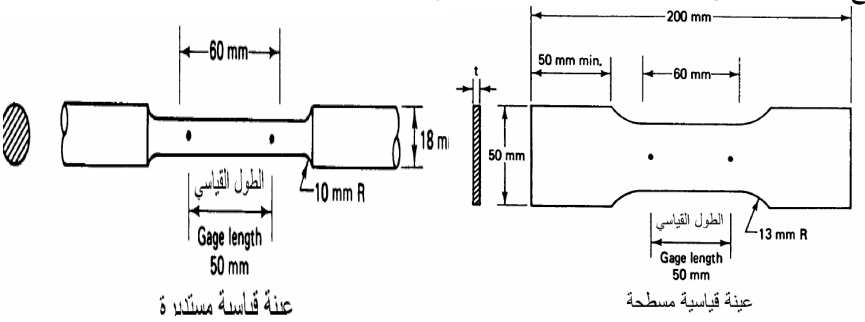
1. تحديد الخواص الميكانيكية للمادة بهدف معرفة التغيرات المختلفة لها أثناء عمليات التصنيع المختلفة (التشغيل أو التشكيل...).
2. القدرة على اختيار المادة الهندسية المناسب للتطبيقات الهندسية المختلفة مع الأخذ في الاعتبار الناحية الاقتصادية ومعاملات الأداء للمادة.
3. لمعرفة الحدود القصوى لتحمل المادة لتحديد العمر الافتراضي لها وأقصى إجهادات تتحملها.
4. المقدرة على ابتكار مواد جديدة تفي بالأغراض التصميمية.

اختبار الشد: Tensile test

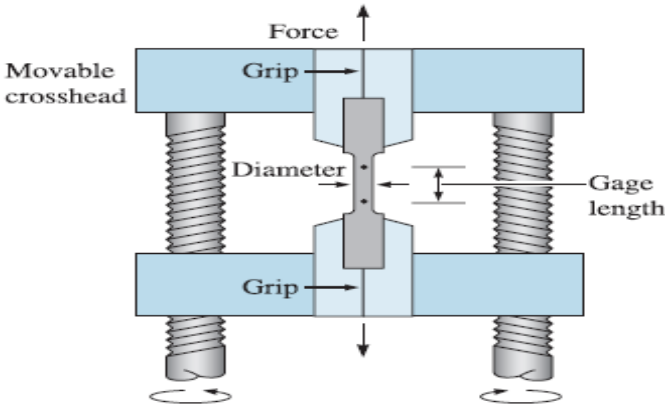
هو عملية تجرى على قطعة اختبار لتعيين خواصها تحت تأثير حمل الشد المحوري في اتجاه واحد حيث ينطبق اتجاه الحمل على المحور الطولي للعينة المختبرة. ويكون الحمل تدريجيا يبدأ من الصفر ويزداد حتى حدوث الكسر بالعينة (اختبار الشد يحدد مدى مقاومة المواد للقوى الإستاتيكية التي تسلط عليها).

أشكال العينات القياسية المستخدمة في اختبار الشد مختلفة وليس لها مقاسات موحدة فمنها المستديرة الطويلة والقصيرة ومنها المسطحة الطويلة والقصيرة (شكل1)

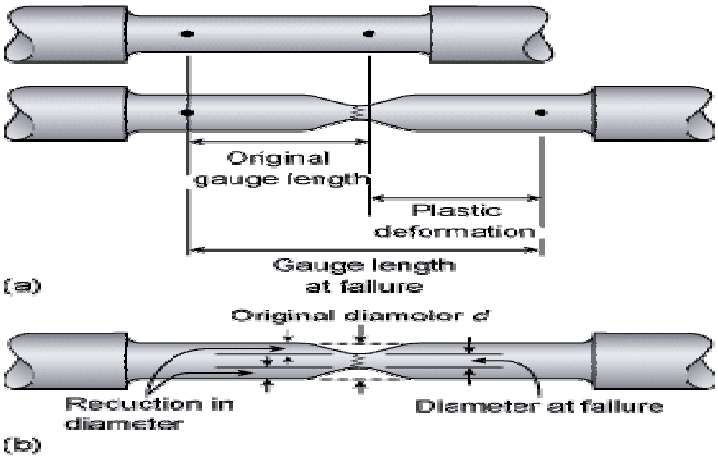
يستخدم معاير الانفعال strain gage لتحديد مقدار الاستطالة ويتم ذلك بعد وضع علامات على العينة قبل تسليط القوة.



الشكل (1) العينات القياسية



الشكل (2) ماكينة اختبار الشد



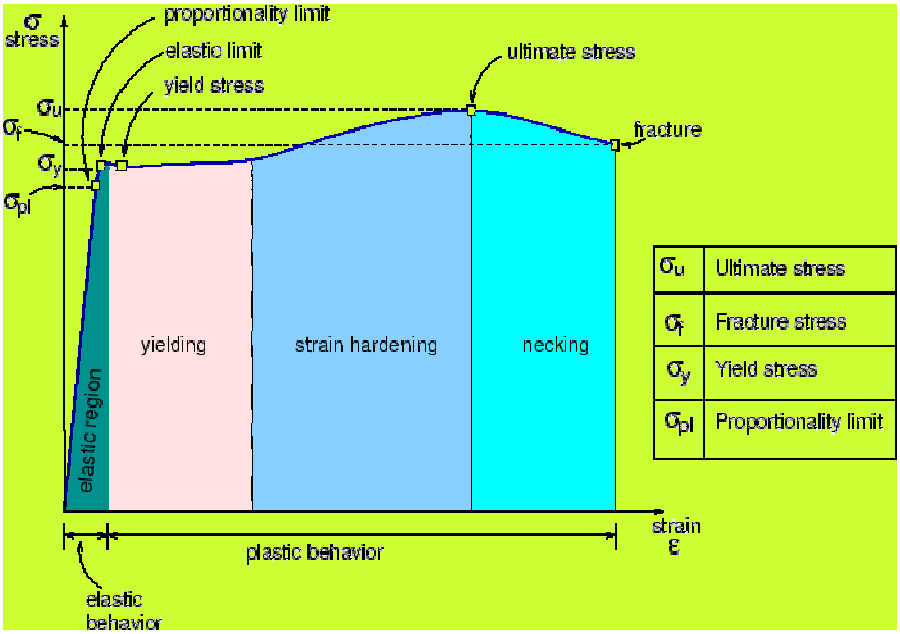
الشكل (3) العينة قبل وبعد اختبار الشد

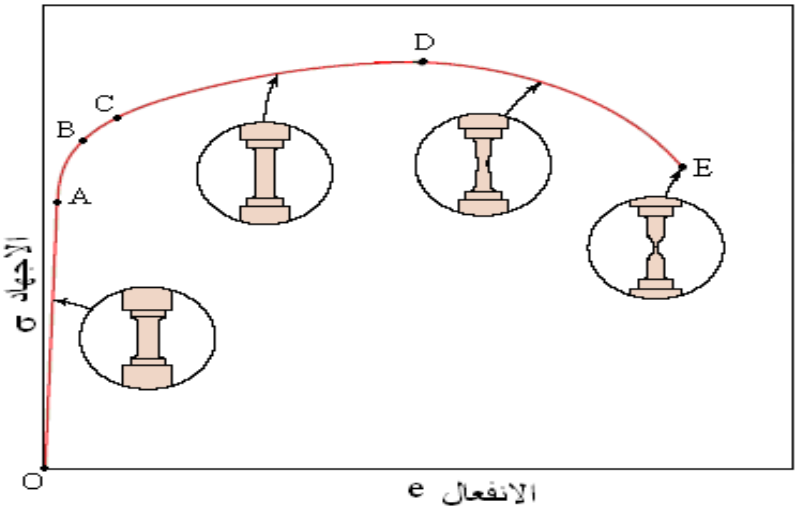
فوائد اختبار الشد:

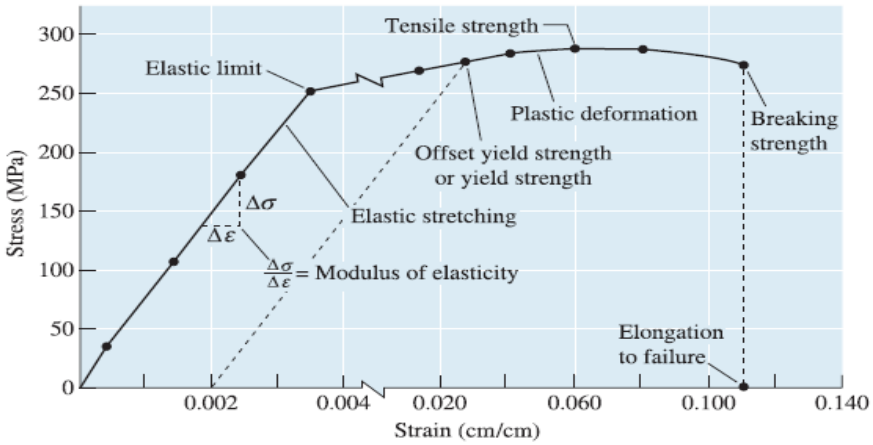
ينتج من اختبار الشد منحنى الإجهاد – الانفعال (الشكل4)، ويستفاد منه في تحديد كل من الخواص الميكانيكية الآتية:

1. إجهاد الشد الأقصى.Ultimate stress
2. إجهاد الكسر. Fracture stress
3. إجهاد الخضوع. Yield stress
4. حد التناسب. Proportionality limit
5. حد المرونة . Elastic limit
6. معامل المرونة (معامل يونج). Modulus of elasticity

7. مطيليه المادة.Ductility







الشكل (4) منحنيات الإجهاد الانفعال الناتجة من اختبار الشد

- **إجهاد شد الأقصى: Ultimate stress** وهي القيمة المتاحة لأقصى حمل تستطيع المادة تحمله محورياً مع ملاحظة أن هذا الإجهاد لا يستخدم عادة في حسابات التصميم لأن العينة قبل هذه النقطة حصل لها تشوه دائم إضافة لذلك بعد الوصول إلى هذ ه النقطة فإن العينة تتشوه تشوها دائما باستخدام إجهاد اقل من الإجهاد الأقصى .
- **إجهاد الكسر: Fracture stress** هو الإجهاد الذي يحدث عنده الكسر.
- **إجهاد الخضوع: Yield stress** هي النقطة التي يتم عندها التحول من الانفعال المرن إلى اللدن وهو الذي يدخل في حسابات التصميم وهو نوعان :

إجهاد الخضوع الأعلى: وهو لا يعتمد كخاصية من خصائص المعدن لأنه يعتمد على ظروف الاختبار.

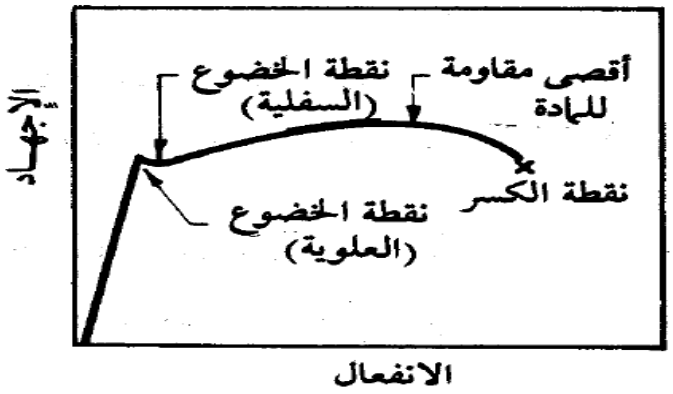
إجهاد الخضوع الأدنى: فهو يعتبر خاصية ميكانيكية لأن قيمته ثابتة لا تتغير.

- **حد التناسب: Proportionality limit** هو أقصى قيمة للإجهاد والتي تكون عندها علاقة الإجهاد بالانفعال خطية.
- **حد المرونة: Elastic limit** هو أقصى إجهاد على المادة بحيث لا يحصل هنالك تشوه دائم عند زوال الحمل.
- **معامل المرونة (معامل يونج): Modulus of elasticity** هو ميل المنحنى في منطقة المرونة وكلما زادت قيمة المعامل كلما قلت قيمة الانفعال المرن وبالتالي تزيد متانة المعدن.
- **مطيليه المادة:Ductility** هي الاستطالة الناتجة حتى الكسر.

سلوك المعادن تحت تأثير حمل الشد:

1/ معادن مطيلة: Ductile Metals

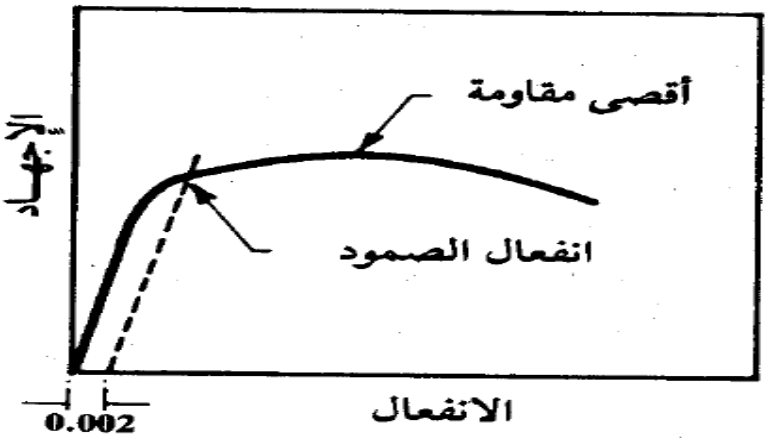
وهي المعادن التي يمتاز منحنى الإجهاد و الانفعال لها بوجود منطقة مرونة Elastic zone ومنطقة اللدونة Plastic zone ومنطقة خضوع Yield zone كما تمتاز بحصول تشوه كبير لها قبل حدوث الكسر وكذلك تمتاز بتكون التخصر Neck.



الشكل (5) منحنى الإجهاد-الانفعال للمعادن المطيلة

2/ معادن شبه مطيلة: Semi Ductile

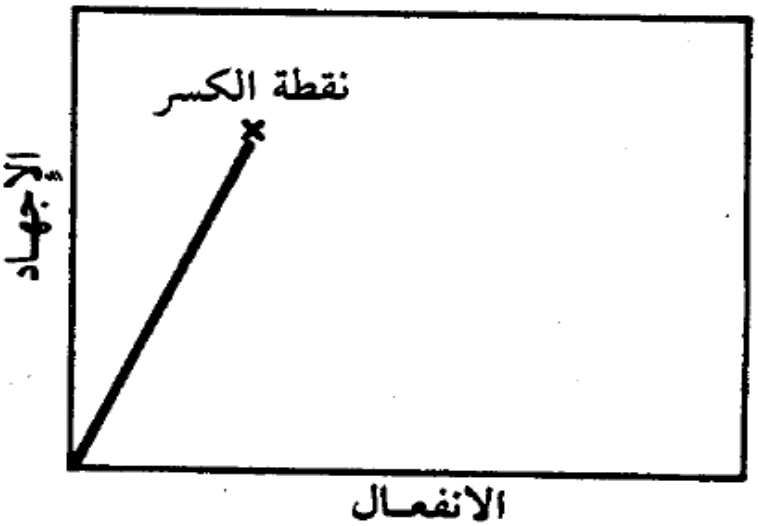
وهي معادن يمتاز منحنى الإجهاد و الانفعال لها بوجود منطقة مرونة و لدونه ولكن دون وجود منطقة خضوع كما يحدث لها تشوه متوسط وتمتاز بتكوين تخصر اقل وضوحا.



الشكل (6) منحنى الإجهاد-الانفعال للمعادن شبه المطيلة

3/ **معادن قصفة: Brittle metals**

هي التي لا يوجد لها منطقة خضوع ولا يوجد لها علاقة تناسب بين الإجهاد والانفعال فالمنحنى من بدايته عبارة عن خط مائل وليست خطا مستقيما كما لا يتكون فيها تخصر.



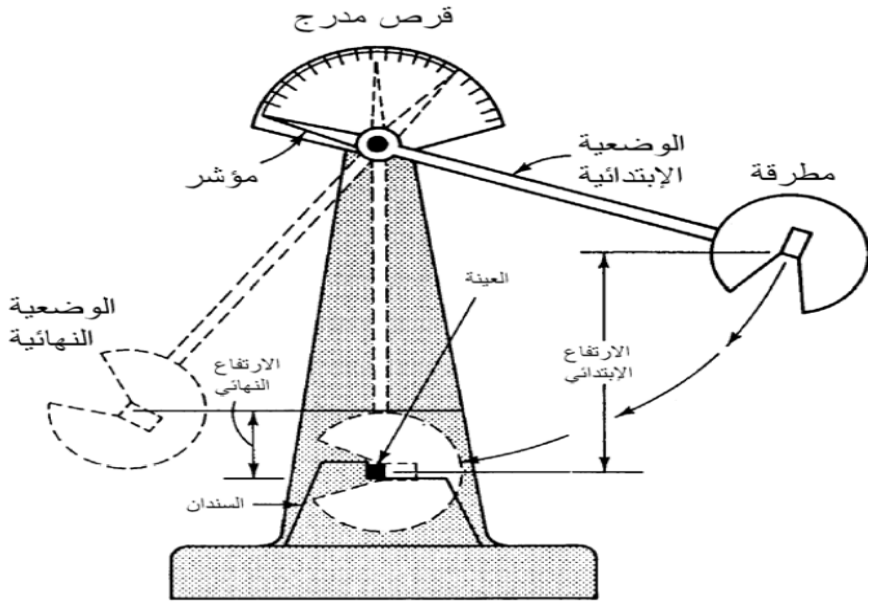
الشكل (7) منحنى الإجهاد-الانفعال للمعادن القصفة

اختبار الصدم: Impact test

يعد اختبار الصدم نوعا مهما من أنواع التحميل الديناميكي ، والغرض منه هو بيان مدي مقاومة المادة للانهيار بتأثير قوي الصدم (التحميل الديناميكي) تحت ظروف التشغيل ، كما يستخدم اختبار الصدم لبيان تأثير تواجد الشروخ في العينات المختبرة علي مقاومتها والتي تسبب ضعفها في تحميل الصدم ، وكذلك لبيان تأثير المعالجات الحرارية علي المعادن وتوضيح مدي قصافتها.

اختبار الصدم القياسي: Standard Impact test

ويجري علي قطعة اختبار قياسية محزوزة تعرض إلي قوي صدم تكسرها ثم يتم تعيين قيمة الشغل المبذول لكسر قطعة الاختبار وتعتبر قيمة هذه الطاقة أساسا لمقارنة المواد مع بعضها البعض من وجهة تحملها للصدم . وهنالك عدة أنواع من اختبارات الصدم القياسية مثل شاربي وأيزود وستارت، ويعتبر اختبار شاربي Charpy و أيزود Izod هما الاختباران الأساسيان في اختبارات الصدم.



الشكل (8) ماكينة اختبار الصدم

وفي كلا الاختبارات يؤثر حمل الصدم علي العينة المختبرة من ثقل متأرجح من ارتفاع (H) له وزن محدد (w) ، فإذا أطلق هذا الثقل فإن مساره يكون دائرة وعند اصطدامه بالعينة المختبرة (المحزوزة) فإنه يصعد إلي ارتفاع آخر (H_o) وبذلك تكون الطاقة الممتصة المستعملة في كسر العينة هي:

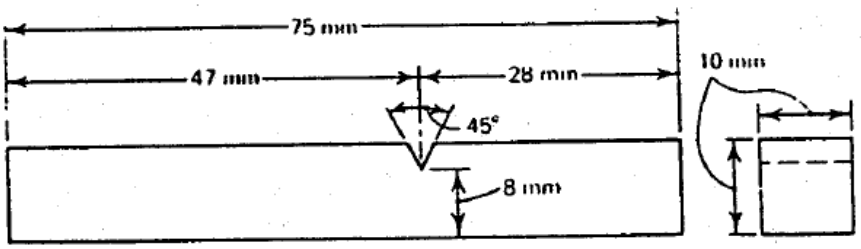
$$U_T = w \times (H - H_0) - F.E.$$

حيث: .F.E الطاقة المفقود نتيجة الاحتكاك ويمكن إهمالها نتيجة صغر قيمتها.

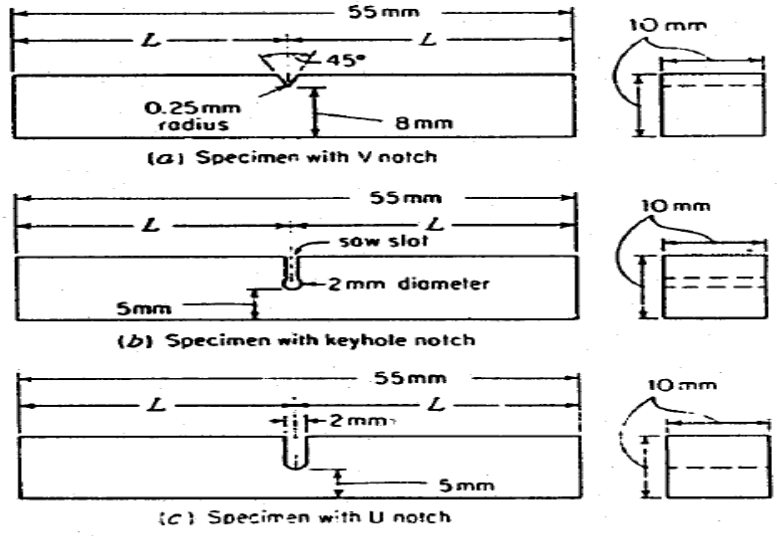
وتستخدم العينات المحزوزة في كل من اختبار شاربي و أيزود لتحديد مكان الكسر وتسهيل الكسر في حاله المواد المطيلة نتيجة وجود تمركز للإجهادات عند قاع الحز يضعف مقاومتها للصدم، وقد تستخدم عينات غير محزوزة في حالة اختبار عينات من الحديد الزهر.

أشكال العينات القياسية:

لكل من اختبار أيزود وشاربي شكل للعينة من حيث شكل الحز ففي اختبار أيزود للصدم يكون شكل الحز ثابت لكل العينات وهو مجري بزاوية 45° وعمق 2 mm أما في حالة شاربي فيكون الحز بأشكال مختلفة ويكون في وسط العينة كما هو موضح في الشكل (9).



الشكل (9) عينة صدم قياسية (أيزود).

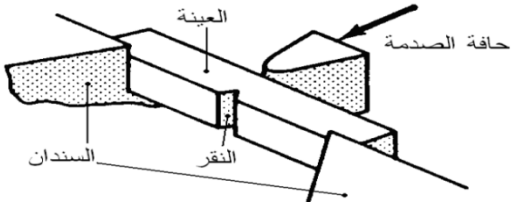


(A)

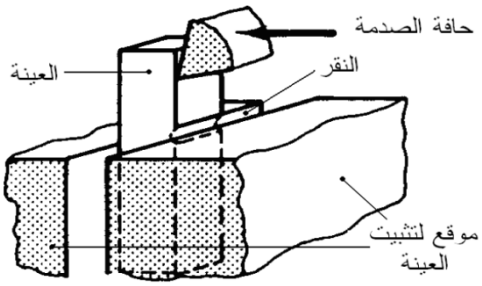
الشكل (10) عينات صدم قياسية (شاربي)

طريقة تثبيت العينات:

في اختبار شاربي تثبت العينة أفقيا بحيث الصدمة تؤثر في منتصفها علي الوجه المقابل للحز. أما في حالة اختبار أيزود فتثبت العينة في ماكينة الاختبار بحيث يكون قاع الحز في مستوي السطح العلوي لكلابات التثبيت وتكون الصدمة علي نفس السطح المحتوي للحز.



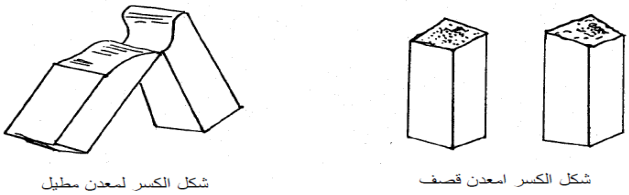
الشكل (11) طريقة تثبيت العينات في اختبار الصدم طريقة شاربي.



الشكل (12) طريقة تثبيت العينات في اختبار الصدم طريقة أيزود.

شكل الكسر للعينات :

من الملاحظ أن شكل الكسر للعينة في كل من اختباري شاربي و أيزود يعكس خاصية المطيلية للمعدن أو قصافته، فالمعدن المطيل تثني عينته مع الكسر أما المعدن القصف فتنكسر عينته عند الحز كما هو موضح في الشكل (13).



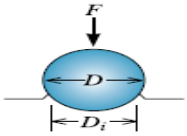
الشكل (13) أشكال الكسر في اختبار الصدم

اختبار الصلادة: Hardness test

الصلادة هي مدى قابلية المادة لمقاومة الاختراق أو الخدش بواسطة الأجسام الأخرى.

اختبار برنيل للصلادة: Bernell hardness

يعتبر من الطرق الشائعة في اختبار الصلادة ، يستخدم في هذا الاختبار كرة مصلدة من الفولاذ بقطر 10 mm على السطح المراد قياس صلادة تحت قوة استاتيكيه (تحميل متدرج) لفترة زمنية لا تقل عن 10 ثواني ومن ثم قياس قطر الأثر بواسطة ميكروسكوب . ومن ثم تحسب النتيجة أما باستخدام معادلة برنيل أو من الجدول مباشرة.



الشكل (14) الأثر في اختبار برنيل للصلادة

معادلة حساب رقم برنيل للصلادة :

$$HB = \frac{2F}{\pi D\left[D - \sqrt{D^2 - D_i^2}\right]}$$

F : الحمل المسلط kg

D : قطر كرة الاختبار mm

D_i : قطر الأثر mm

لا يفضل اختبار برنيل في الحالات التالية:

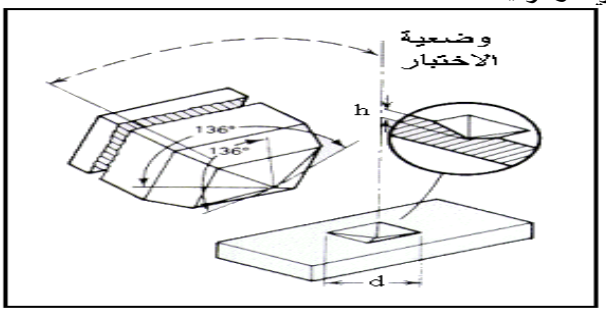
1. إذا كان السطح غير مستوي.

2. إذا كان العينة المراد اختبارها رفيعة جدا(السمك أقل من 6 mm – 9 أو 3/8 بوصة).

3. إذا كان العينة المراد اختبارها صلدة جدا.

اختبار فيكرز: Vickers Hardness

أداة الاختبار في هذا النوع عن شكل هرمي من الماس مائلة بزاوية 136° وتحت أحمال تتراوح ما بين kg (5 - 10 – 30 – 50) هذا النوع من الاختبار متاح للمواد الصلدة والطرية والرفيعة.



الشكل (15) الأثر في اختبار فيكرز للصلادة

معادلة حساب رقم فيكرز للصلادة :

$$HVQ = \frac{1.854 \times P}{d^2}$$

P : الحمل المسلط kg

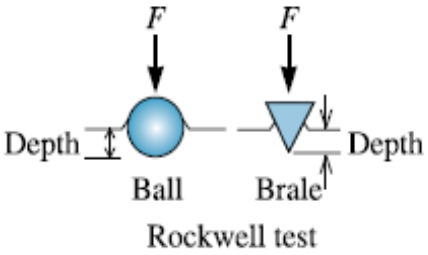
d : اكبر مقاس للأثر (قطر الأثر)

مزايا اختبار صلادة المعادن بطريقة فيكرز:

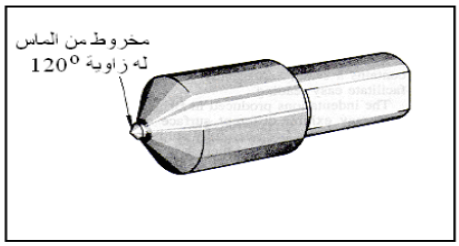
- يعطي قيمة دقيقة لرقم الصلادة.
- الأحمال المؤثرة صغير إذا ما قورنت بالأحمال في اختبار برنيل.
- يمكن بواسطته تحديد صلادة المعادن شديدة الصلادة نظرا لاستخدام الهرم الماسي.
- يمكن بواسطته تحديد صلادة المنتجات الرقيقة السمك والتي لا يصلح اختبار لها برنيل (فمثلا يمكن إيجاد صلادة شفرة حلاقة بواسطة اختبار فيكرز)

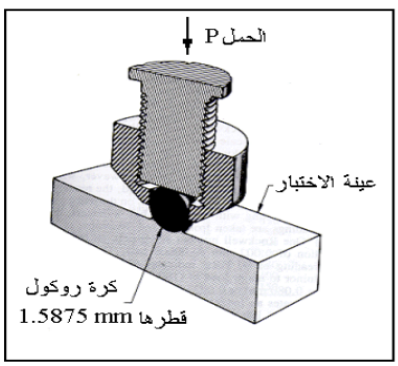
اختبار روكول للصلادة: Rockwell Hardness

هذا الاختبار يختلف عن الاختبارين السابقين في أن قيمة الصلادة لا تكون بدلالة المساحة السطحية للثلمة (الأثر) وإنما باستخدام عمق الثلمة الذي يعرف مباشرة بمؤشر على مقياس مدرج. يستخدم فيه كرة الفولاذ المصلد أو باستخدام مخروط من الماس بزاوية 120^0 .



Rockwell test





الشكل (16) اختبار روكول للصلادة

يحتوى الجهاز على تدريج يعطي القراءة مباشرة أثناء تسليط لأحمل على العينة. أولا تستخدم قوة أولية لإنزال المثلم للاتصال مع السطح بضغط محدود ثم تطبق

قوة لتجعل المثلم يخترق المادة وبعد ذلك تزال القوة الإضافية فيرجع رأس المثلم عن العمق الأخير قليلا أي ينخفض العمق لان التشوه لم يكون لدنا كاملا.

الفرق بين العمق النهائي والعمق الابتدائي قبل وضع القوة الإضافية يمثل الزيادة الثابتة في الاختراق (e) بسبب القوة الإضافية.

يمكن إيجاد رقم روكول من العلاقة الرياضية التالية: **HR = E - e**

حيث E ثابت يحدده شكل المثلم والذي يكون 100 لمثلم مخروطي من الماس ويكون 130 لمثلم كروي من الفولاذ المصلد.

مقاييس روكول للصلادة:

رقم روكول هو رقم اعتباري حدده روكول على تدريج قرص جهازه على الأساس السابق ذكره، والمقاييس المختلفة لتحديد الصلادة بطريقة روكول تعتمد على صلادة المعدن المختبر وبالتالي يحدد الحمل النهائي المستخدم و الأداة المحدثة للأثر كما موضحة في الجدول التالي والمقاييس المخلفة هي:

مقياس روكول A مقياس روكول B مقياس روكول C

مقياس روكول	الجسم المحدث للأثر (الأداة)	الحمل الكلي للأثر (Kg)	المعادن التي يحدد صلادتها المقياس
مقياس A	مخروط بحرف ماسي مستدير (Brale)	60	شرائح الصلب المصلد الرقيقة و المعادن و السبائك الشديدة الصلادة و في الاختبار إذا أريد أن يكون أثر الحادث صغيراً
مقياس B	كرة صلب مصلدة قطرها 1.5888 mm	100	الصلب الكربوني الطري و المتوسط و الألواح و القضبان المعدنية الطويلة
مقياس C	مخروط بحرف ماسي مستدير (Brale)	150	الصلب المصلد أو السبائك ذات الصلادة أكثر من روكول 100

ويقسم القرص المدرج لكل مقياس إلى 100 قسم يمثل كل قسم منها عمق اثر قيمته 0.002mm فمثلا مقياس روكول B يبدأ من رقم 30 (كصفر للبداية) وينتهي برقم 130 ومقياس روكول C يبدأ من رقم صفر وينتهي برقم 100 ويكون إذا كان عمق الأثر بالمليمتر h ، رقم روكول للصلادة كالتالى:

$$\text{Rockwell B Hardness Number} = 130 - \frac{h}{0.002}$$

الفصل الثالث
البنية التركيبة للمواد البللورية

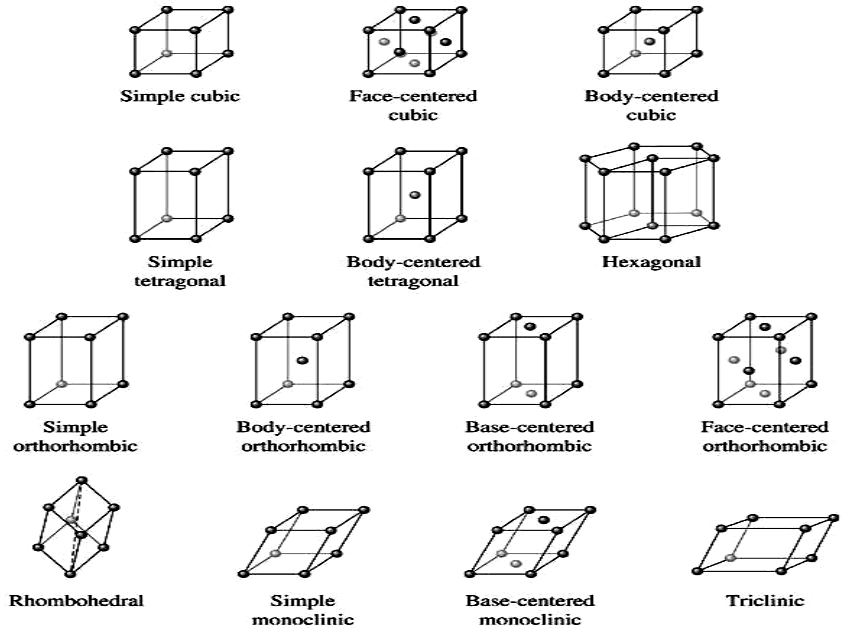
مقدمة:

بما أن ذرة المادة لها شكل كروي، فإن هذه الذرات تتراص فوق بعضها البعض.هذا التراص إما أن يكون كل ذرة تماما فوق الذرة الأخرى أو كل ذرة في الفراغ بين الذرتين في المستوى الآخر. هذا التراص،ينتج ما يعرف بالشبكة البلورية وتسمى الوحدة في هذه الشبكة بالخلية (Cell). عموما تنقسم المواد الهندسية من ناحية التركيب البلوري إلى قسمين رئيسيين هما:

- **مواد متبلورة:** Crystalline هي المواد التي تتراص ذراتها بانتظام وتشمل المواد المتبلورة كل الفلزات وكثير من الخزفيات وبعض البوليمرات.
- **مواد غير متبلورة:** Amorphous فيكون تراص ذراتها غير منتظم.

البنية البللورية للفلزات :

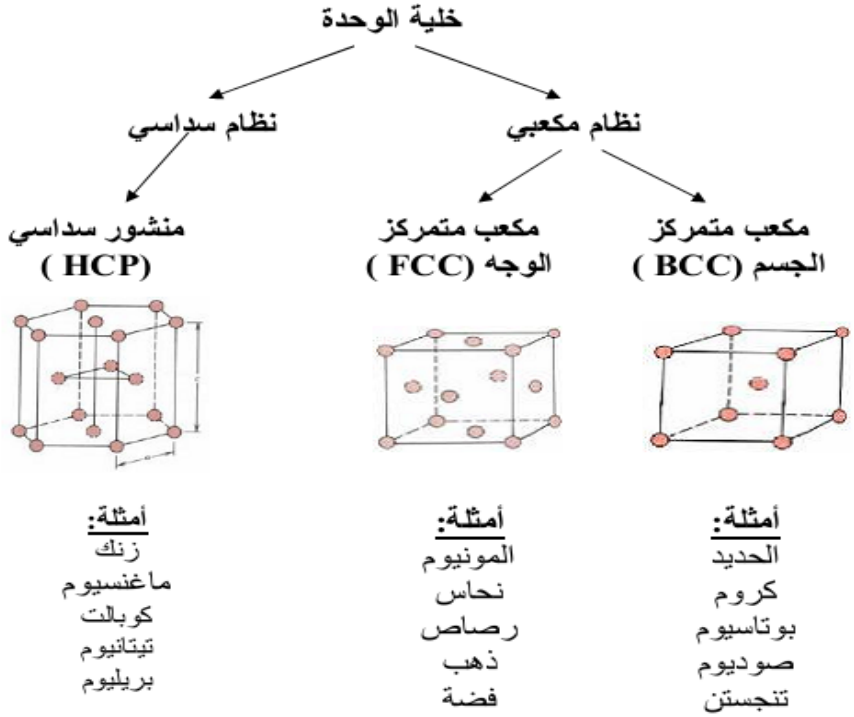
تتجمع الذرات في بناء منتظم في معظم الحالات، لتنتج البناء الكامل للفلز. وتسمى وحدة البناء هذه بالخلية التي تكرر نفسها في الثلاث اتجاهات. ونجد أن الطرق التي تتكون بها البنية البلورية لا تتعدى 14 شكلاكما مبين في الشكل (1).



الشكل (1) أشكال البنية البلورية للفلزات

والدراسات أولت أهمية كبيرة إلى ثلاث أشكال هي:

- الشكل المكعب الممركز الجسم (BCC) في هذه الخلية يكون في كل ركن من أركان الخلية ذرة واحدة وفي مركز المكعب توجد ذرة واحدة.
- الشكل المكعب الممركز الوجه (FCC) في هذه الخلية يكون في كل ركن من أركان المكعب ذرة وفي كل وجه من أوجه المكعب كذلك ذرة.
- الشكل السداسي محكم الرص (عالي الحشد) (HCP) هذه الخلية عبارة عن شكل منشور سداسي قائم الزاوية في كل زاوية من زوايا القاعدتين هنالك ذرة وفي منتصف كل القاعدة هنالك ذرة، بإضافة إلى أن هنالك ثلاث ذرات في منتصف هذا الشكل المنشورى.



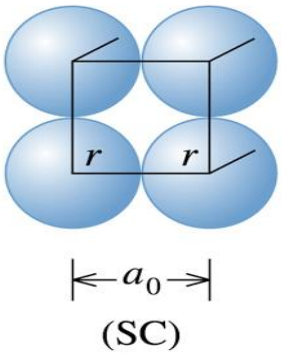
الشكل (2) الأشكال الأكثر شيوعا للبنية البلورية للفلزات

عموما تتبلور الفلزات في أحد الصور الآتية :

1) المكعب البسيط Simple Cubic (Sc)
2) المكعب ممركز الجسم Body Center Cubic (BCC)
3) المكعب ممركز الوجه Face Center Cubic (FCC)
4) السداسي محكم الرص exagonal Closed-Packed (HCP)

المكعب البسيط (SC):

نلاحظ في التركيب البلوري للمكعب البسيط بأن الخلية في هذا التركيب البلوري تتكون من ذرات تتراص فوق بعضها البعض أي أن الذرات تتراص في طبقات متشابهة تماما.



(SC)

الشكل (3) المكعب البسيط

ضلع المكعب = a_0 = 2r

عدد الذرات في كل زاوية يوجد $\frac{1}{8}$ ذرة، لأن كل ذرة مشتركة مع 8 خلايا، وبالتالي

يكون عدد الذرات في الخلية الواحدة = $8 * \frac{1}{8}$ = 1 (ذرة واحدة)

حجم الذرات (شكل كروي) = $\frac{4}{3}\pi R^3 * 1$

حجم الخلية = $(2R)^3 = a^3$

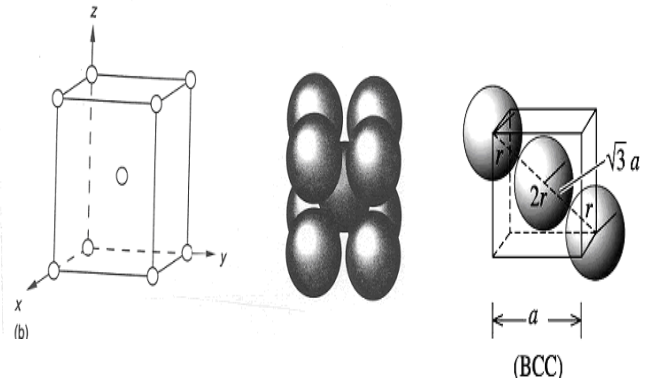
معامل الرص الذري لخلية ذات المكعب البسيط = حجم الذرات / حجم الخلية

$$\frac{\frac{4}{3}\pi R^3 * 1}{8R^3} = 0.52$$

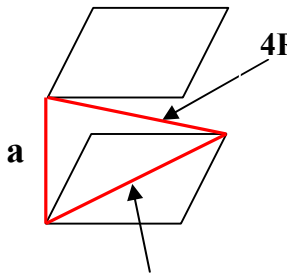
أي أن 52 % من حجم الخلية مليء بالذرات و48% فراغ

المكعب ممركز الجسم (BCC):

تتكون خلية المكعب الممركز الجسم من مكعب ذرات تتوسطه ذرة كاملة في منتصف الخلية.



الشكل (4) المكعب ممركز الجسم



$$X^2 = a^2 + a^2 = 2a^2$$

$$(4R)^2 = a^2 + X^2$$

$$= a^2 + 2a^2 = 3a^2$$

$$16\,R^2 = 3a^2$$

$$\mathbf{a} = \frac{4}{\sqrt{3}}\ \mathbf{R}$$

عدد الذرات في خلية المكعب الممركز الجسم = $1 + 8 * \frac{1}{8} = 2$

حجم الذرات = $\frac{4}{3}\pi R^3 * 2$

حجم الخلية = $a^3 = R^{3} * \frac{(4)^3}{(\sqrt{3})^3}$

معامل الرص الذري لخلية ذات المكعب ممركز الجسم = $\frac{\text{حجم الذرات}}{\text{حجم الخلية}}$

$$2 * \frac{4}{3}\ \pi R^3$$

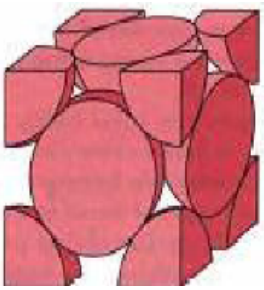
$$R^{3} * \frac{(4)^3}{(\sqrt{3})^3}$$

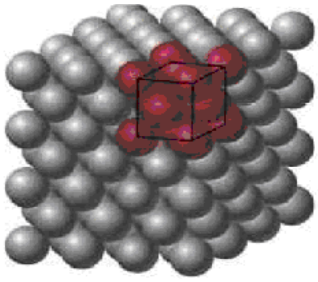
$$\frac{8.37}{12.32} = 0.68$$

أي أن 68 % من حجم الخلية مليء بالذرات و 32 % فراغ.

المكعب ممركز الوجه (FCC):

في المكعب ممركز الوجه نجد عند زاويا المكعب هنالك ذرة وفي مركز كل وجه من أوجه المكعب هنالك نصف ذرة، وبالتالي تكون عدد الذرات التي تساهم في خلية المكعب ممركز الوجه كالآتي:





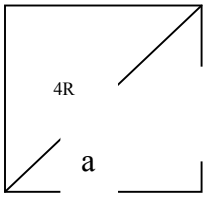
الشكل (5) المكعب ممركز الوجه

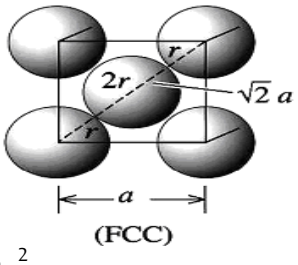
في كل زاوية $\frac{1}{8}$ ذرة أي ذرة واحدة في 8 زوايا $(8 * \frac{1}{8} = 1)$

وفي كل وجه من الأوجه الستة $\frac{1}{2}$ ذرة $(6 * \frac{1}{2} = 3)$

عدد الذرات في الخلية الواحدة = 1+3 = 4 ذرات

حجم الذرات $= 4 * \frac{4}{3} * R^3 \pi$





$$(4R)^2 = a^2 + a^2 = 2a^2$$

$$16R^2 = 2a^2$$

$$a = \frac{4}{\sqrt{2}} R$$

$$\text{حجم الخلية} = a^3 = R^3 \frac{(4)^3}{(\sqrt{2})^3}$$

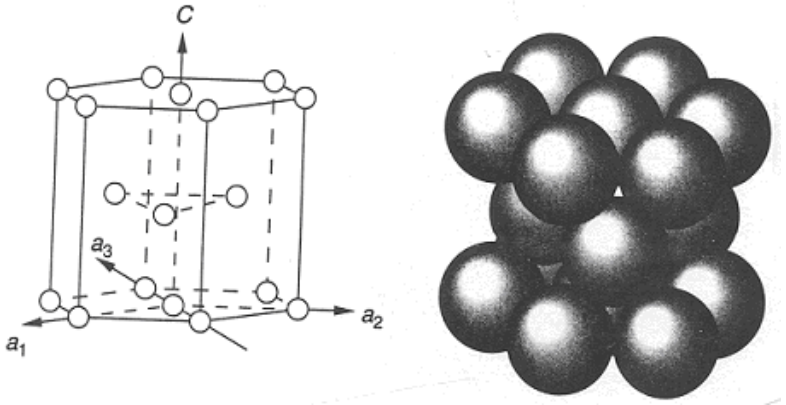
معامل الرص للخلية الممركزة الوجه =

$$\frac{\frac{4}{3}\pi R^3 x\,4}{\frac{(4)^3}{(\sqrt{2})^3}R^3} = 0.74$$

أي أن 74 % من حجم الخلية مليء بالذرات و 26 % فراغ

السداسي محكم الرص (HCP):

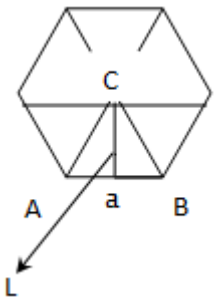
السداسي محكم الرص (عالي الحشد) يتكون من منشور سداسي قائم الزاوية في كل زاوية من زواياه ذرة. وفي منتصف كل قاعدة ذرة وبين القاعدتين في منتصف المنشور السداسي يوجد ثلاث ذرات. كما في الشكل (6).



الشكل (6) السداسي عالي الحشد

حجم السداسي عالي الحشد = مساحة القاعدة * الارتفاع

لو أخذنا المثلث ABC، هذا المثلث متساوي الأضلاع ∴



$a = 2R$

مساحة المثلث = $\frac{1}{2} * 2R*L$

لإيجاد قيمة L نأخذ نصف المثلث ABC

$(2R)^2 = R^2 + L^2$

$^2 = 4R^2 - R^2$

$L = \sqrt{3}\,R$

بالتعويض عن قيم L في مساحة المثلث

$$\frac{1}{2} * 2R * \sqrt{3}\,R = \sqrt{3}\,R^2$$

مساحة قاعدة السداسي تتكون من 6 مثلثات وهي تساوي

$$6 * \sqrt{3}\, R^2$$

ارتفاع السداسي = 4R

حجم السداسي = مساحة القاعة * الارتفاع = $4R*6*\sqrt{3}R^2 = 24*\sqrt{3}*R^3$

عدد الذرات في السداسي = 2

حجم الذرات = $2 * \frac{4}{3} * R^3 \pi$

معامل الرص الذري للسداسي محكم الرص = حجم الذرات / حجم السداسي = 0.74

الجدول (1): خصائص البنية البلورية لبعض المعادن

Structure	a_0 versus r	Atoms per Cell	Coordination Number	Packing Factor	Examples
Simple cubic (SC)	$a_0 = 2r$	1	6	0.52	Polonium (Po), α-Mn
Body-centered cubic	$a_0 = 4r/\sqrt{3}$	2	8	0.68	Fe, Ti, W, Mo, Nb, Ta, K, Na, V, Zr, Cr
Face-centered cubic	$a_0 = 4r/\sqrt{2}$	4	12	0.74	Fe, Cu, Au, Pt, Ag, Pb, Ni
Hexagonal close-packed	$a_0 = 2r$ $c_0 \approx 1.633a_0$	2	12	0.74	Ti, Mg, Zn, Be, Co, Zr, Cd

الفصل الرابع
خلل التركيب البللوري
Crystalline Defects

مقدمة:

خواص المواد الهندسية تتأثر بوجود خلل في التركيب البللوري، ومن المهم التعرف هذا الخلل والدور الذي يلعبه في سلوك المادة.

إن الوضع المثالي للتركيب البللوري هو أن تكون الخلية منتظمة في شكلها ومنتظمة في عدد ذراتها. ولكن هذا الوضع المثالي لا يوجد في واقع المواد الهندسية وهذه العيوب أو التشوهات ليس في كل الأحوال غير مرغوب فيها، بل ذلك يعتمد اعتمادا أساسيا على طبيعة الاستخدامات. فمثلا المواد التي تستعمل في المعدات الإلكترونية يكون الخلل غير مرغوب فيه ولكن في أحيان أخرى تجد أن الخلل أمر مرغوب فيه. يمكن تقسيم أنواع الخلل كالآتي:

a) الخلل النقطي Point defect
b) الخلل الخطي Line defect
c) الخلل السطحي Surface defect
d) الخلل الحجمي Volume defect

الخلل النقطي:

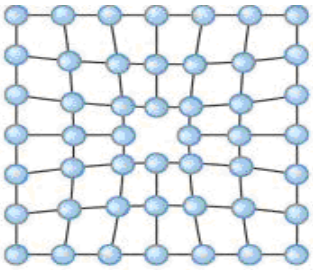
الخلل النقطي خلل محلي يحدث نتيجة اضطراب في التركيبة البللورية وذلك باختلال ذرة أو عدة ذرات عن مكانها الطبيعي. هذا الاختلال يحدث نتيجة للطاقة المكتسبة أثناء عمليات التسخين التي تمر بها عمليات التصنيع أو يحدث نتيجة لوجود شوائب أو لوجود عناصر تضاف إلى المواد الأساسية كمادة لصنع سبيكة معينة.

ومن أنواع الخلل النقطي كالآتي:

الفجوات خلل سكوتكس المواقع الاقتحامية خلل فرينكل.

الفجوات:

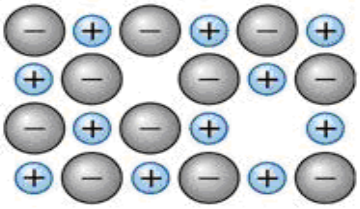
الفجوة هي غياب ذرة أو ذرات عن مكانها الطبيعي وتتكون الفجوات عادة أثناء عمليات تجمد المعدن ويسمى هذا النوع من العيوب بعيوب شوتكي (Schottky defect) الشكل (1).



الشكل (1) الفجوات

خلل سكوتكس:

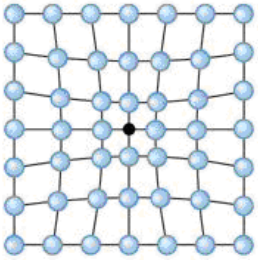
هذا النوع من الخلل يشابه الفجوة ولكنه يظهر في المركبات التي يجب أن تحافظ على توازن الشحنات كما في الشكل (2).



الشكل (2) خلل سكوتكس

المواقع الاقتحامية:

بعض الذرات تدخل نفسها في مواقع الفراغات بين الذرات وخاصة في حالة التراكيب ذات معامل الرص القليل الشكل (3)، هذا النوع من الخلل يؤدي إلى تشوهات في التركيب الذري وذلك لأن الذرة المقتحمة تكون أصغر من حجم الفراغ البيني في الشبكة البللورية.

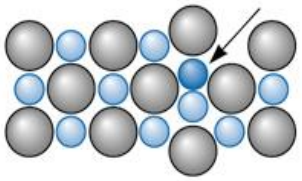


الشكل (3) المواقع الاقتحامية

خلل فرينكل:

يكون هذا الخلل عندما ينتقل أحد الأيونات من موقعه المنتظم إلى فراغ بيني الشكل (4).

والتراكيب البللورية ذات الرص المحكم تحتوي على عدد قليل من الاقتحامات الذرية وخلل فرينكل مما تحويه من فجوات وخلل سكوتكس وذلك للاحتياج إلى طاقة إضافية لانتقال الذرات من موقعها إلى موقع آخر.



الشكل (4) خلل فرينكل

<u>الانخلاعات الخطية (الخلل الخطي): Dislocation (line defect)</u>

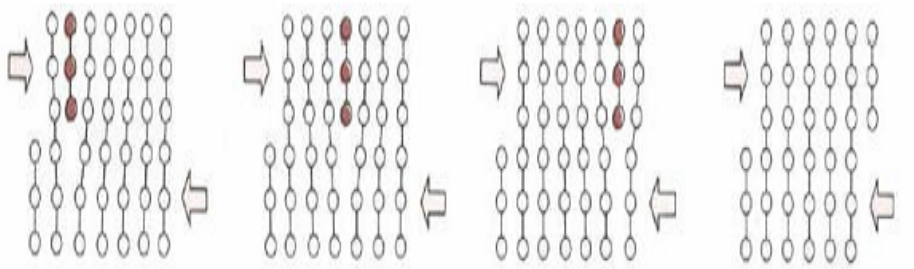
تنقسم أنواع الإنخلاعات إلى نوعين أساسيين

الانخلاع الطرفي Edge dislocation

الانخلاع اللولبي Screw dislocation

الانخلاع الطرفي:

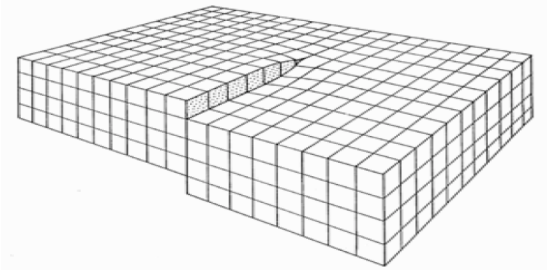
الانخلاع الطرفي الشكل (5) هو عبارة عن اختلال في خط مستقيم في الشبكة البللورية ،وجود هذا الخط بهذا الشكل يكو ِن مناطق اختلال على جانبي خط الانخلاع dislocation-line نتيجة لهذا الاختلال تكون الذرات مضغوطة ومناطق أخرى تكون فيها الذرات في حالة شد ، لذا تكون منطقة الانخلاع منطقة زيادة في الطاقة ، ينتج عن هذه الطاقة حركة في ذرات الشبكة حول خط الانخلاع وتسمى هذه المسافة التي تتحركها الذرة بمتجه بيرجرBurger-vector يكون متجه بيرجر في الانخلاع الطرفي متعامد مع خط الانخلاع. يكون الانخلاع موجبا إذا كانت علامة الانخلاع $(\perp)$ تشير إلى أعلى، ويكون سالبا إذا كانت علامة الانخلاع $(\top)$ تشير إلى أسفل . في حالة التقاء انخلاعين أحدهما سالبا والثاني موجبا يتلاشى الانخلاعين وتكون لدينا شبكة بلورية منتظمة ليس بها خلل.



الشكل (5) يبين الانخلاع الطرفي

الانخلاع اللولبي:

يتكون هذا الانخلاع نتيجة لتعرض الشبكة البللورية إلى إجهاد قص كما في الشكل (6)، فيرتفع جزء من الشبكة البللورية وينخفض الجزء الآخر من الشبكة البللورية والخط الفاصل بين الانخفاض والارتفاع يسمى بمستوى الانزلاق وتنتج حالة من التوتر نتيجة لوجود حالة شد وحالة ضغط.

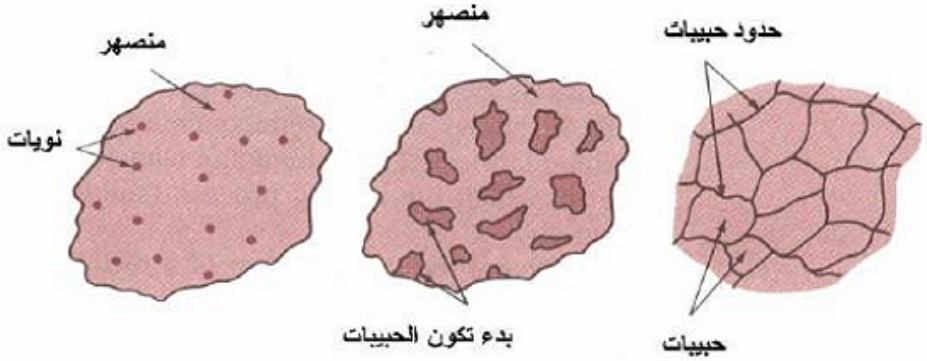


الشكل (6) الانخلاع اللولبي

الخلل السطحي: surface defect

تحتوي البنية الداخلية للمعادن وبعض المواد الصلبة على عدة حبيبات ، الحبيبة هي المنطقة (الجزء) من المادة التي تتراص فيه ذرات المادة في اتجاه واحد ، وبالتالي يكون اتجاه الذرات في كل حبيبة مختلف عن اتجاه ذرات الحبيبة التي تجاورها الشكل (7).

الخلل السطحي يكون في الحدود أو المستويات التي تفصل المادة إلى مناطق. في كل منطقة يكون التركيب الذري متجها في اتجاه مختلف عن المنطقة الأخرى (الحبيبات).



الشكل (7) مراحل تكون الحبيبات وحدود الحبيبات

حدود الحبيبة هو السطح الذي يفصل الحبيبة عن جارتها وتكون المسافة ما بين الحبيبة والأخرى في بعض المناطق صغيرة وفي بعض الأماكن تكون المسافة كبيرة، مما يحدث مناطق ضغط ومناطق شد.

إن التحكم في الخواص الميكانيكية يعتمد اعتمادا أساسيا على حجم الحبيبة. صغر حجم الحبيبة يعني أن عدد الحبيبات يكون كثيرا وبالتالي يزيد كمية حدود الحبيبات، صغر حجم الحبيبة يقلل من المسافة التي يتحركها الانخلاع وبالتالي تزيد المتانة ، ومعادلة هول- بتش (Hall-Pitch) تصف ذلك:

$$\sigma y = \sigma o + kd^{-1/2}$$

حيث:

σy : إجهاد الخضوع

$\sigma o, k$: ثابتان يختلفان باختلاف المادة

d : متوسط قطر الحبيبة

تكوين الحبيبة:

تتكون الحبيبة أثناء تجمد المعدن وذلك حسب المراحل الآتية:

أولا عند ابتداء تجمد المعدن يتجمع عدد من الذرات مكونا نواة وذلك في مراكز مختلفة من المعدن المنصهر، تتشابه هذه الأنوية في شكلها العام ولكنها تختلف في اتجاهاتها.

ثانيا يحدث نمو لكل نواة بإضافة مزيدا من الذرات حول النواة وتستمر الحبيبة في النمو إلى أن تصطدم بنواة أخرى مكونة حبيبة أخرى.

إن لسرعة التبريد أثر كبير في عدد الأنوية وبالتالي حجم الحبيبة. كلما كان التبريد بطئ يكون عدد الأنوية قليل وبالتالي حجم الحبيبة كبير أما في حالة التبريد السريع يكون عدد الأنوية كبير وبالتالي حجم الحبيبات صغير.