

المواد الهندسية

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# المواد الهندسية

الدكتور

محمد أحمد محمد البشير

كلية الهندسة والتقنية - جامعة وادي النيل

جمهورية السودان

٢٠٢٠م



الأكاديمية الوطنية الحديثة للكتاب الجامعي

الكتاب : **المواد الهندسية**  
المؤلف : الدكتور / محمد أحمد محمد البشير

رقم الطبعة : الأولى  
تاريخ الإصدار : ٢٠٢٠  
حقوق الطبع : محفوظة للناشر

الناشر : الأكاديمية الحديثة للكتاب الجامعي  
العنوان : ٨٢ شارع وادي النيل المهندسين ، القاهرة ، مصر  
تلفاكس : ٥٦١ ٣٣٠٣٤ (٠٠٢٠٢) ١٧٣٤٥٩٣ / ٠١٢٢  
البريد الإلكتروني: [m.academyfub@yahoo.com](mailto:m.academyfub@yahoo.com)

رقم الإيداع : ١٦٩٥٦ / ٢٠١٩  
الترقيم الدولي : 978-977-831-017-7

## **تحذير :**

حقوق النشر: لا يجوز نشر أي جزء من هذا الكتاب أو اختزان مادته بطريقة الاسترجاع أو نقله على أي نحو أو بأية طريقة سواء أكانت إلكترونية أو ميكانيكية أو خلاف ذلك إلا بموافقة الناشر على هذا كتابةً ومقدماتاً.

# **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 أساساً 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:

#### **Metallic materials: المواد المعدنية:**

- 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 Steel Alloy 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.

#### **Non-Metallic materials: المواد الغير معدنية:**

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 بالبلمره وتوجد في أشكال مختلفة كالبلاستيك ومواد التغليف وهياكل المنتجات. وتنقسم اللدائن إلى نوعين:

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

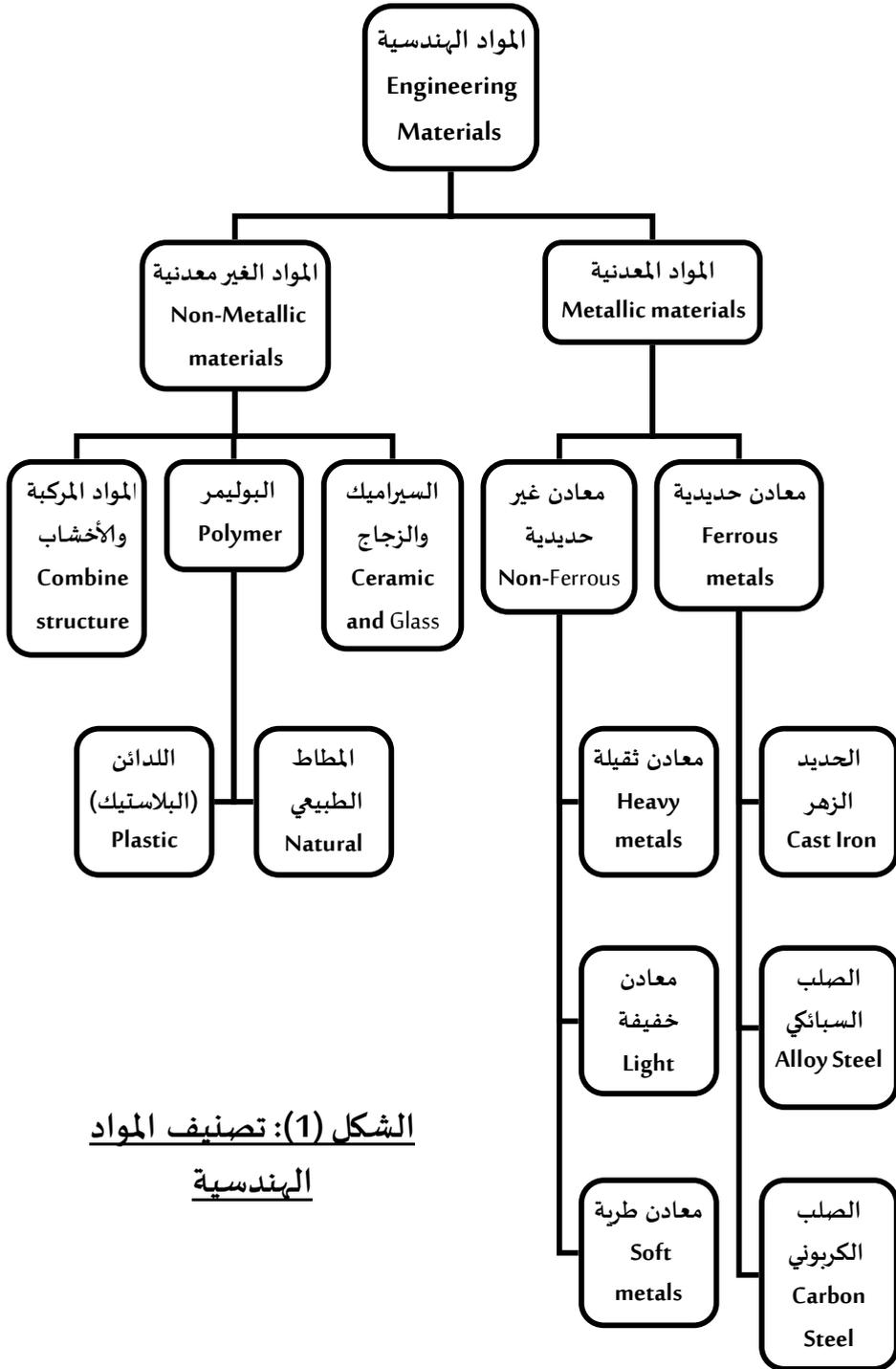
## 2. السيراميك والزجاج: Ceramic and Glass

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 والجبس 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 تتركب مع مادة أخرى فإنها تعطي حلامقبولاً 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). وهناك 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.

الخواص الميكانيكية للمواد الهندسية:

تعرف الخواص الميكانيكية بأنها الخواص التي تتعلق بسلوك المادة (مقاومة أو تغيرات ...الخ) 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 بطيئاً ويزداد تدريجياً حتى يصل قيمته القصوى بدون إحداث أي صدم أو إهتزاز.

**الحمل الديناميكي: Dynamic loading:**

هو الذي يكون في شكل صدمة أو إهتزاز مفاجئاً.

**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 الأخرى.

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

اللدونة: Plasticity هي قابلية 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 اختبارات مثل:

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

## الفصل الثاني

### اختبارات الخواص الميكانيكية

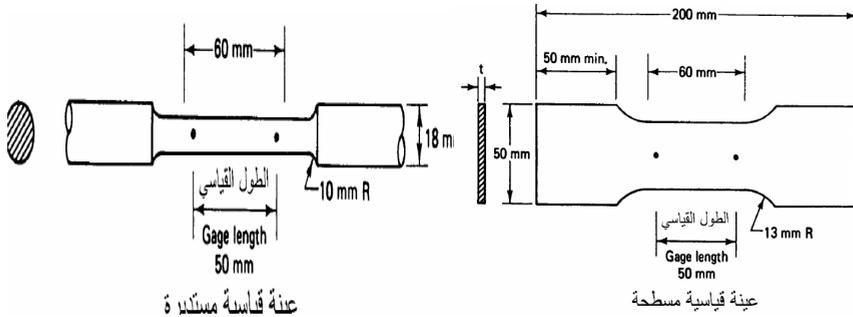
### Mechanical Properties Tests

#### أهمية إجراء الاختبارات الميكانيكية للمعادن:

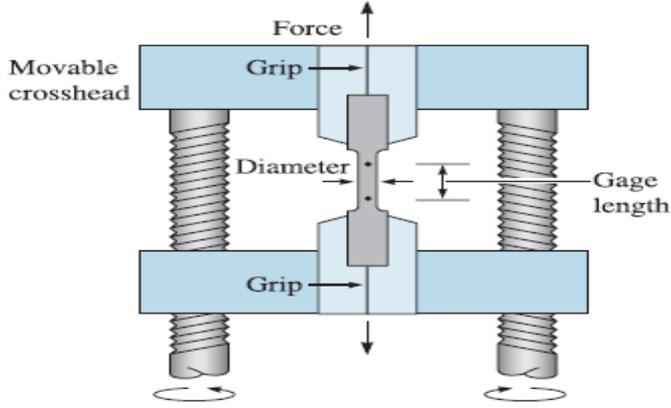
1. تحديد الخواص الميكانيكية للمادة بهدف معرفة التغيرات المختلفة لها أثناء عمليات التصنيع المختلفة (التشغيل أو التشكيل...).
2. القدرة على اختيار المادة الهندسية المناسب للتطبيقات الهندسية المختلفة مع الأخذ في الاعتبار الناحية الاقتصادية ومعاملات الأداء للمادة.
3. لمعرفة الحدود القصوى لتحمل المادة لتحديد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

#### اختبار الشد: Tensile test

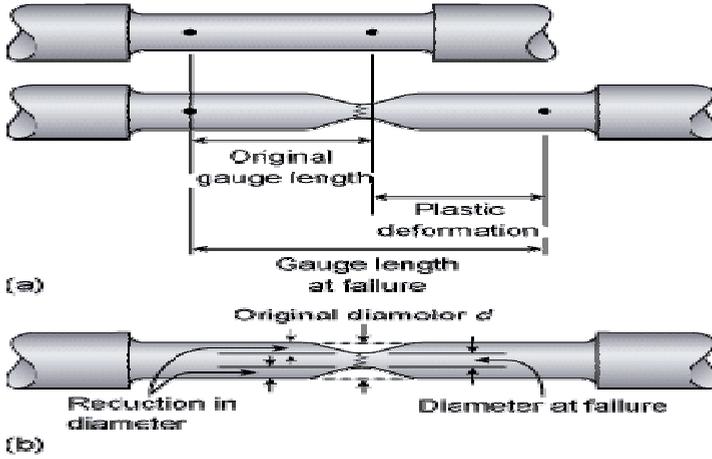
هو عملية تجرى على قطعة اختبار لتعيين خواصها تحت تأثير حمل الشد المحوري في اتجاه واحد حيث ينطبق اتجاه الحمل على المحور الطولي للعينة المختبرة. ويكون الحمل تدريجياً يبدأ من الصفر ويزداد حتى حدوث الكسر بالعينة (اختبار الشد يحدد مدى مقاومة المواد للقوى الإستاتيكية التي تسلط عليها). أشكال العينات القياسية المستخدمة في اختبار الشد مختلفة وليس لها مقاسات موحدة فمنها المستديرة الطويلة والقصيرة ومنها المسطحة الطويلة والقصيرة (شكل 1) يستخدم معايير 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



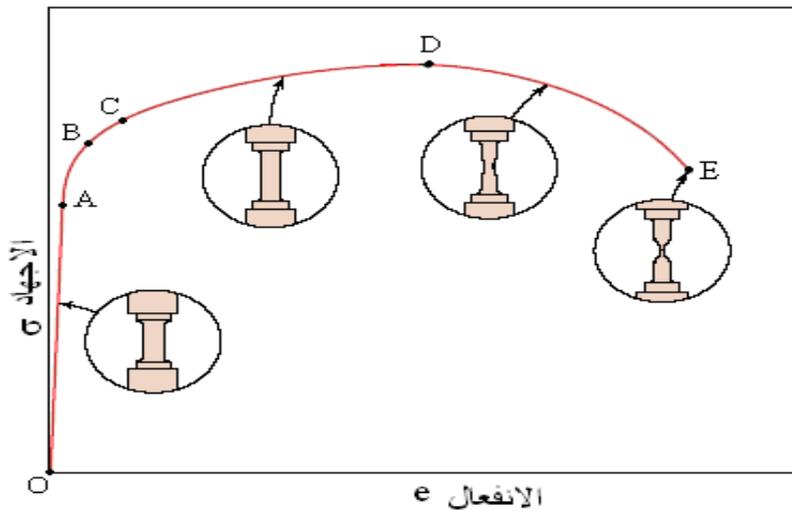
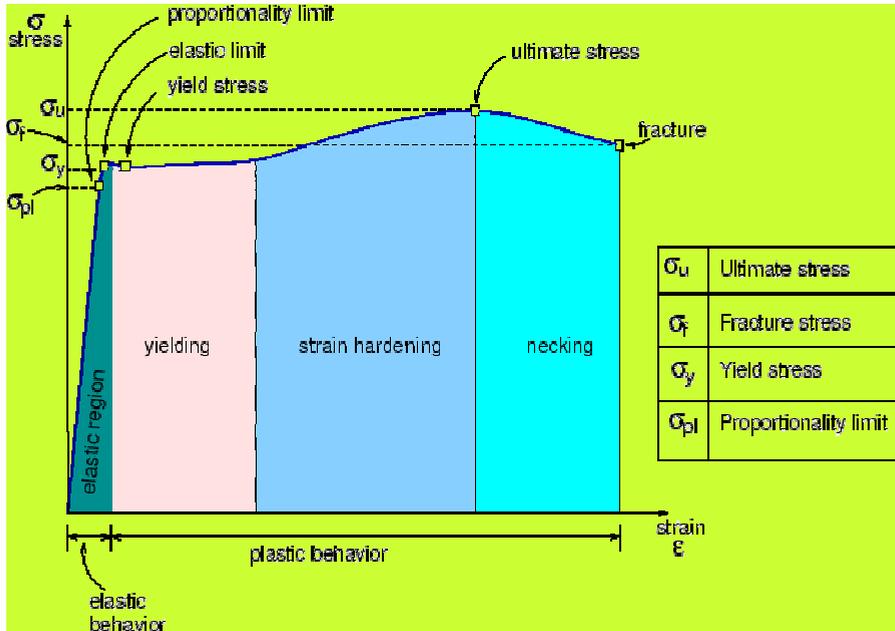
الشكل (3) العينة قبل وبعد اختبار الشد

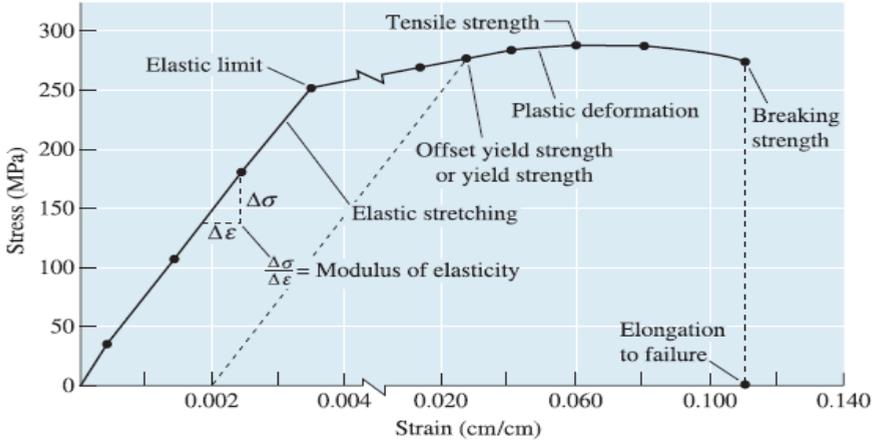
فوائد اختبار الشد:

ينتج من اختبار الشد منحنى الإجهاد - الانفعال (الشكل 4)، 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. مطييه المادة. Ductility.





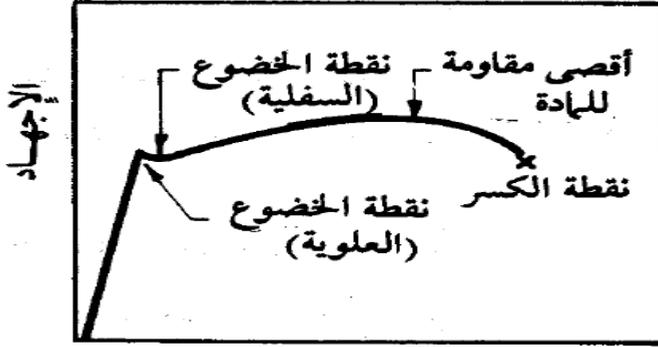
الشكل (4) منحنيات الإجهاد الانفعال الناتجة من اختبار الشد

- إجهاد شد الأقصى: **Ultimate stress** وهي القيمة المتاحة لأقصى حمل تستطيع المادة تحمله محوياً 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 هذه النقطة فإن العينة تتشوه تشوهاً دائماً باستخدام إجهاد أقل 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.
- مطيلية المادة: **Ductility** هي الاستطالة الناتجة حتى الكسر.

سلوك المعادن تحت تأثير حمل الشد:

### 1/ معادن مطييلة: Ductile Metals

وهي المعادن التي يمتاز منحني الإجهاد والانفعال 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.

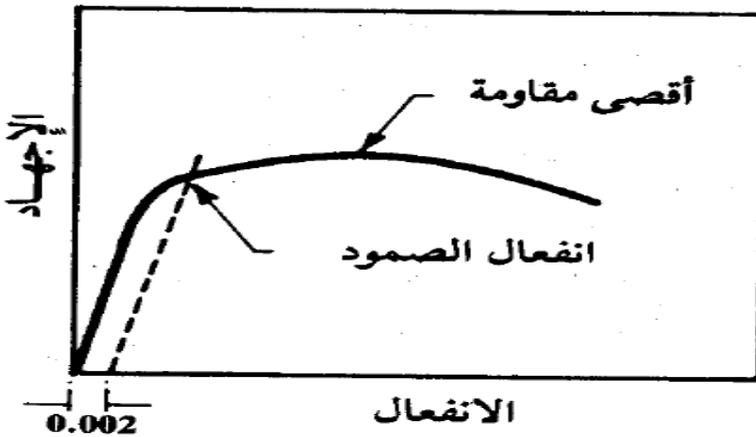


الانفعال

الشكل (5) منحني الإجهاد-الانفعال للمعادن المطييلة

### 2/ معادن شبه مطييلة: Semi Ductile

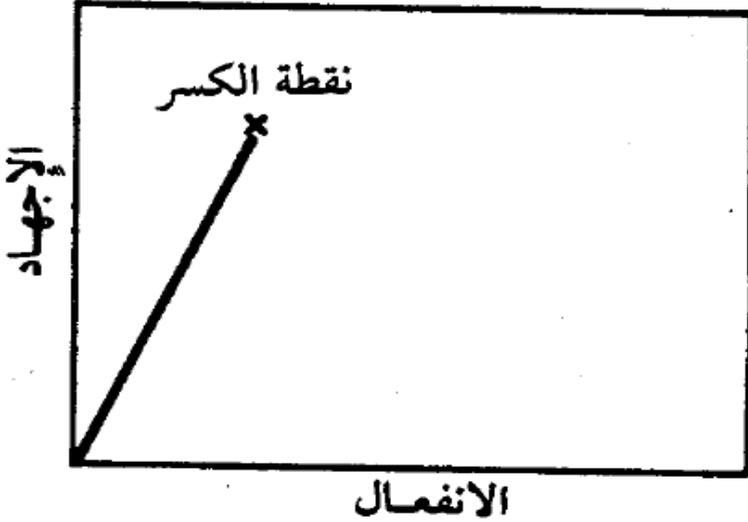
وهي معادن يمتاز منحني الإجهاد والانفعال لها بوجود منطقة مرونة و لدونه ولكن دون وجود منطقة خضوع كما يحدث لها تشوه متوسط وتمتاز بتكوين تخصر اقل وضوحا.



الشكل (6) منحني الإجهاد-الانفعال للمعادن شبه المطييلة

### 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 خطاً مستقيماً كما لا يتكون فيها تخرير.



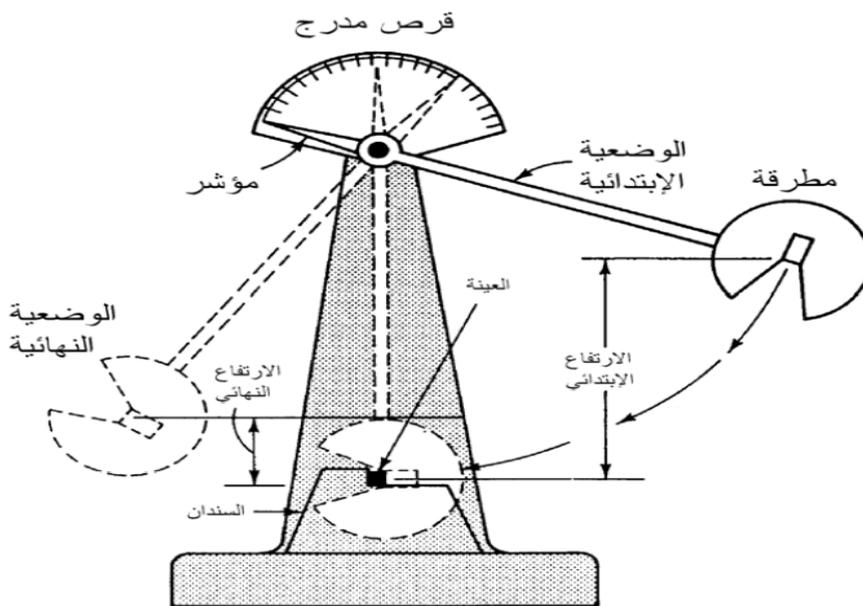
الشكل (7) منحنى الإجهاد-الانفعال للمعادن القصفة

### اختبار الصدم: Impact test

يعد اختبار الصدم نوعاً مهماً من أنواع التحميل الديناميكي ، والغرض منه هو بيان مدى مقاومة المادة للاهتزاز بتأثير قوي الصدم (التحميل الديناميكي) تحت ظروف التشغيل ، كما يستخدم اختبار الصدم لبيان تأثير تواجد الشروخ في العينات المختبرة على مقاومتها والتي تسبب ضعفها في تحميل الصدم ، وكذلك لبيان تأثير المعالجات الحرارية على المعادن وتوضيح مدى قسافتها.

### اختبار الصدم القياسي: Standard Impact test

ويجري على قطعة اختبار قياسية محزوزة تعرض إلى قوي صدم تكسرها ثم يتم تعيين قيمة الشغل المبدول لكسر قطعة الاختبار وتعتبر قيمة هذه الطاقة أساساً لمقارنة المواد مع بعضها البعض من وجهة تحملها للصدم . وهناك عدة أنواع من اختبارات الصدم القياسية مثل شاربي وأيزود وستارت، ويعتبر اختبار شاربي Charpy ويزود Izod هما الاختباران الأساسيان في اختبارات الصدم.



الشكل (8) ماكينة اختبار الصدم

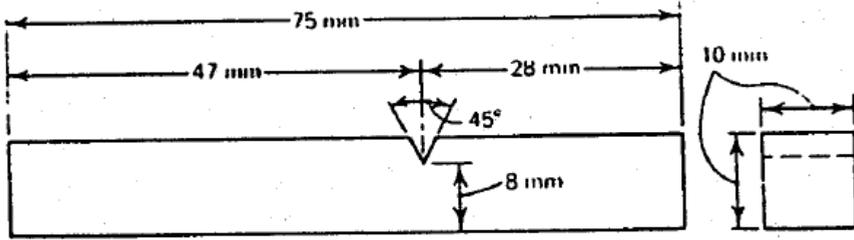
وفي كلا الاختبارات يؤثر حمل الصدم علي العينة المختبرة من ثقل متأرجح من ارتفاع (H) له وزن محدد (w)، فإذا أطلق هذا الثقل فإن مساره يكون دائرة وعند اصطدامه بالعينة المختبرة (المحزوزة) فإنه يصعد إلي ارتفاع آخر (H<sub>0</sub>) وبذلك تكون الطاقة الممتصة المستعملة في كسر العينة هي:

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

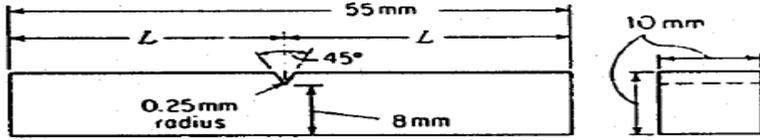
حيث: F.E. الطاقة المفقودة نتيجة الاحتكاك ويمكن إهمالها نتيجة صغر قيمتها. وتستخدم العينات المحزوزة في كل من اختبار شاربي و أيزود لتحديد مكان الكسور وتسهيل الكسر في حالة المواد المطيلة نتيجة وجود تمركز للإجهادات عند قاع الحز يضاعف مقاومتها للصدم، وقد تستخدم عينات غير محزوزة في حالة اختبار عينات من الحديد الزهر.

#### أشكال العينات القياسية:

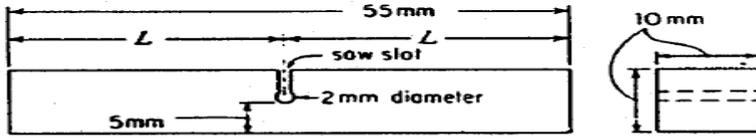
لكل من اختبار أيزود وشاربي شكل للعينة من حيث شكل الحز ففي اختبار أيزود للصدم يكون شكل الحز ثابت لكل العينات وهو مجري بزاوية 45° وعمق 2 mm أما في حالة شاربي فيكون الحز بأشكال مختلفة ويكون في وسط العينة كما هو موضح في الشكل (9).



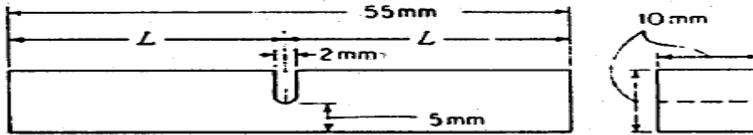
الشكل (9) عينة صدم قياسية (أيزود).



(a) Specimen with V notch



(b) Specimen with keyhole notch



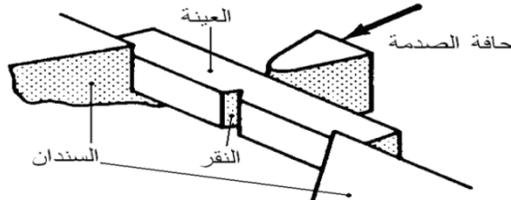
(c) Specimen with U notch

(A)

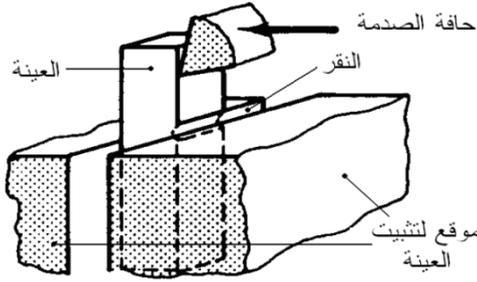
الشكل (10) عينات صدم قياسية (شاربي)

طريقة تثبيت العينات:

في اختبار شاربي تثبت العينة أفقياً 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 لكلايات التثبيت وتكون الصدمة علي نفس السطح المحتوي للحز.



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



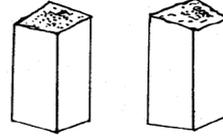
الشكل (12) طريقة تثبيت العينات في اختبار الصدم طريقة أيزود.

شكل الكسر للعينات :

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



شكل الكسر لمعدن مطيل



شكل الكسر لمعدن قصف

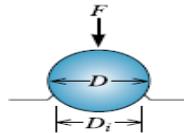
الشكل (13) أشكال الكسر في اختبار الصدم

### 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 استاتيكية (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

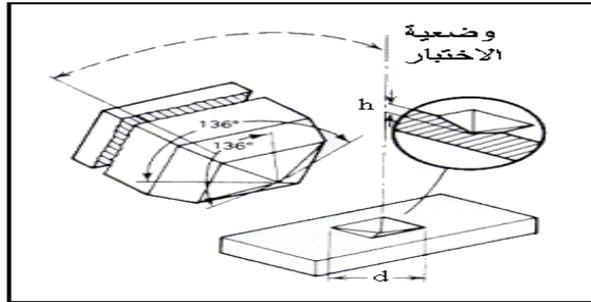
$D_i$  : قطر الأثر mm

لا يفضل اختبار برنيل في الحالات التالية:

1. إذا كان السطح غير مستوي.
2. إذا كان العينة المراد اختبارها رقيقة جدا (السماك 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  $136^\circ$  وتحت أحمال تتراوح ما بين 5 - 10 - 30 - 50 kg هذا النوع من الاختبار متاح للمواد الصلدة والظرية والرقيقة.



الشكل (15) الأثر في اختبار فيكرز للصلادة

معادلة حساب رقم فيكرز للصلادة :

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

P : الحمل المسلط kg

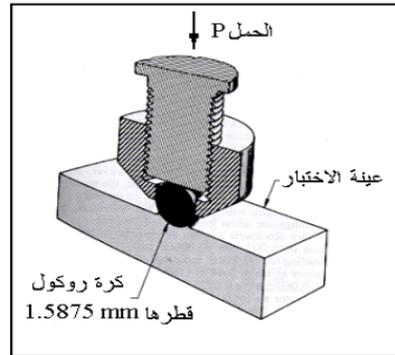
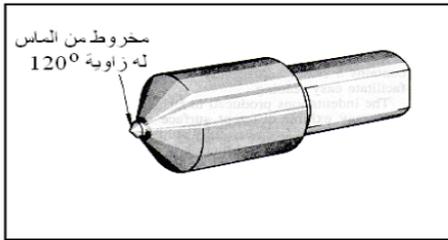
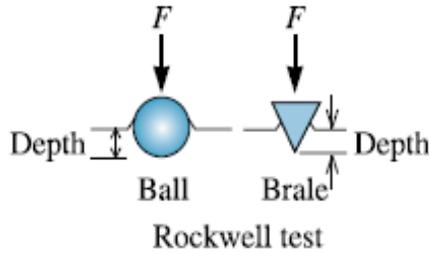
d : أكبر مقياس للأثر (قطر الأثر)

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  $120^{\circ}$ .



### 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 قليلاً أي ينخفض العمق لان التشوه لم يكون لدينا كاملاً. 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 تدرج 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 صلابتها المقياس
مقياس A	مخروط بحرف ماسي مستدير ( Brale )	60	شرايح 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 كالتالي:

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

## الفصل الثالث البنية التركيبية للمواد البلورية

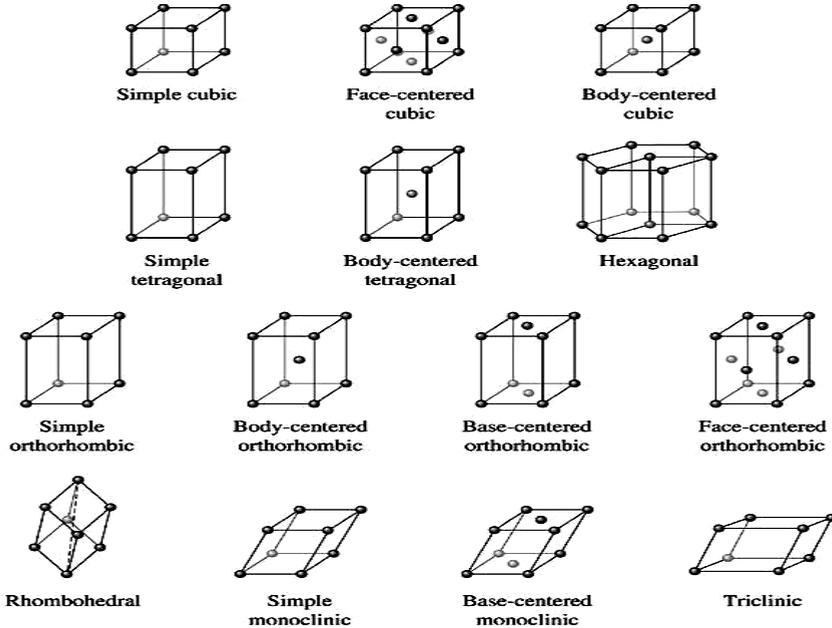
### مقدمة:

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 ترص ذراتها غير منتظم.

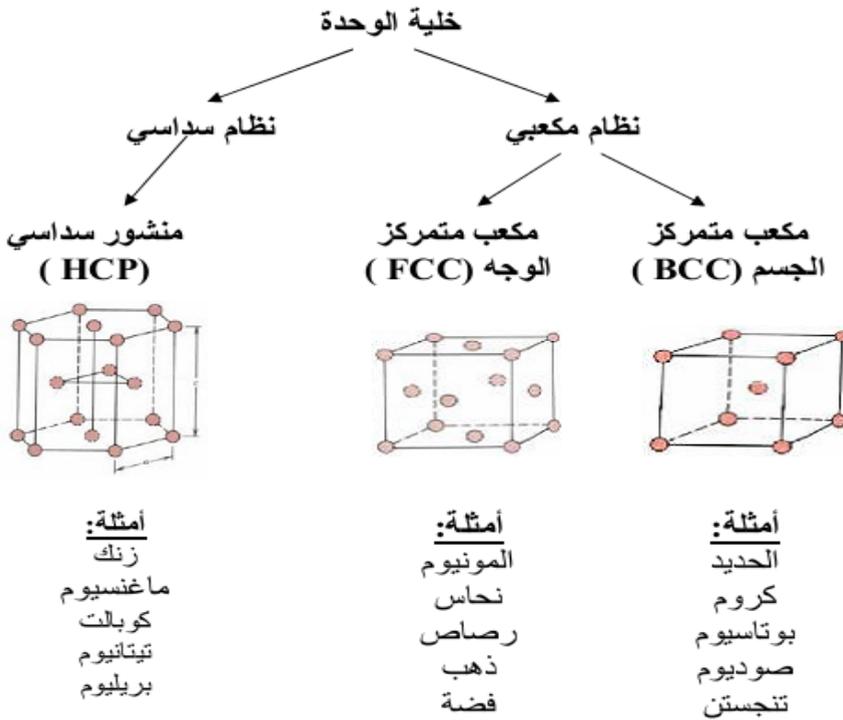
### البنية البلورية للفلزات:

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 شكلا كما 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 المنشوري.



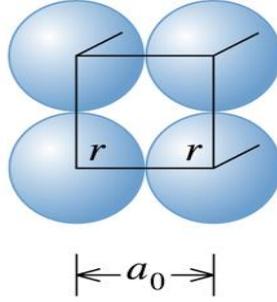
### الشكل (2) الأشكال الأكثر شيوعا للبنية البلورية للفلزات

عموما تتبلور الفلزات في أحد الصور الآتية :

- (1) المكعب البسيط (Simple Cubic (Sc)
- (2) المكعب ممرکز الجسم (Body Center Cubic (BCC)
- (3) المكعب ممرکز 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

$$2r = a_0 = \text{ضلع المكعب}$$

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

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

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

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

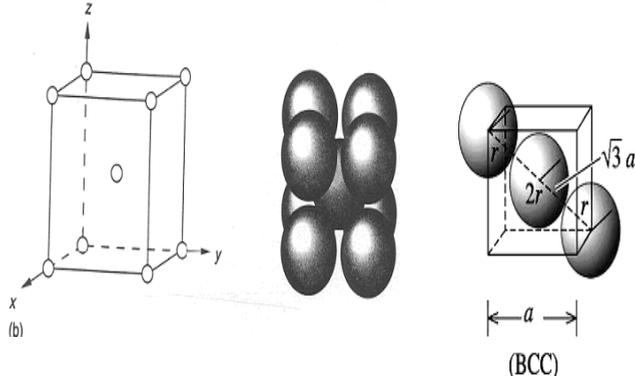
معامل الرص الذري لخلية ذات المكعب البسيط =  $\frac{\text{حجم الذرات}}{\text{حجم الخلية}}$

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

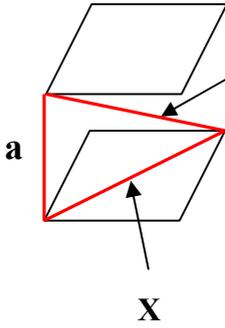
أي أن 52% من حجم الخلية مليء بالذرات و48% فراغ

### المكعب ممرکز الجسم (BCC):

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



الشكل (4) المكعب ممرکز الجسم



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

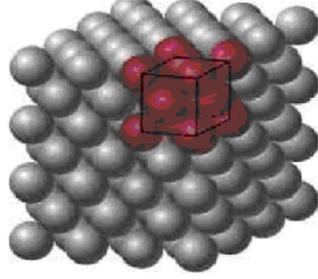
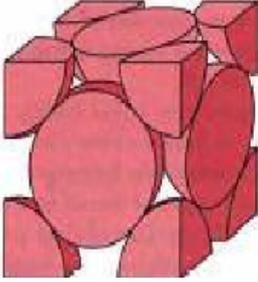
$$R^3 * \frac{(4)^3}{(\sqrt{3})^3}$$

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

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

### المكعب ممرکز الوجه (FCC):

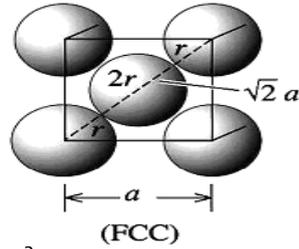
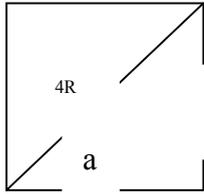
في المكعب ممرکز الوجه نجد عند زوايا المكعب هنالك ذرة وفي مركز كل وجه من أوجه المكعب هنالك نصف ذرة، وبالتالي تكون عدد الذرات التي تساهم في خلية المكعب ممرکز الوجه كالآتي:



الشكل (5) المكعب ممرکز الوجه

في كل زاوية  $\frac{1}{8}$  ذرة أي ذرة واحدة في 8 زوايا ( $1 = \frac{1}{8} * 8$ )  
 وفي كل وجه من الأوجه الستة  $\frac{1}{2}$  ذرة ( $3 = \frac{1}{2} * 6$ )  
 عدد الذرات في الخلية الواحدة =  $4 = 3 + 1$  ذرات

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



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

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

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

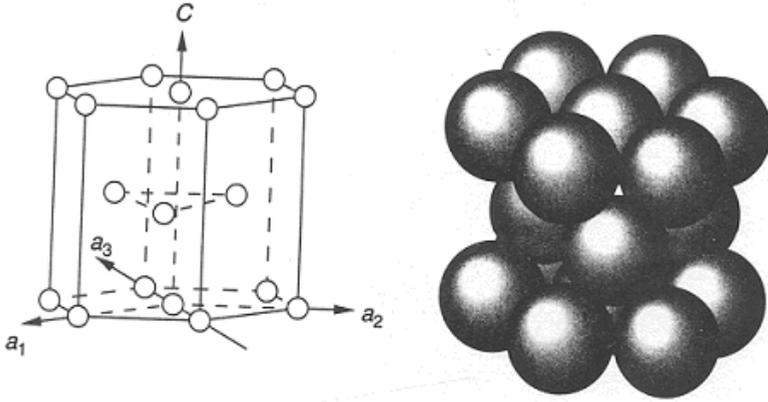
$$\text{حجم الخلية} = a^3 = R^3 \frac{(4)^3}{(\sqrt{2})^3}$$

معامل الرص للخلية الممركزة الوجه =

$$\frac{\frac{4}{3} \pi R^3 \times 4}{(4)^3 R^3} = 0.74$$

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

$$a = 2R$$

$$\frac{1}{2} * 2R * L = \text{مساحة المثلث}$$

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 القاعدة \* الارتفاع =  $24 * \sqrt{3} * R^3 = 4R * 6 * \sqrt{3} R^2$

عدد الذرات في السداسي = 2

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

معامل الرص الذري للسداسي محكم الرص =  $\frac{\text{حجم الذرات}}{\text{حجم الرص}} = 0.74$

حجم

السداسي

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), $\alpha$ -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 اعتماداً أساسياً على طبيعة الاستخدامات. فمثلاً 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 كالتالي:

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

### الخلل النقطي:

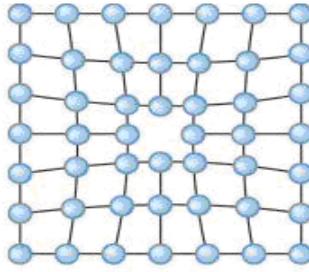
الخلل النقطي خلل محلي يحدث نتيجة اضطراب في التركيبة البللورية وذلك باختلال ذرة أو عدة ذرات عن مكانها الطبيعي. هذا الاختلال يحدث نتيجة للطاقة المكتسبة أثناء عمليات التسخين التي تمر بها عمليات التصنيع أو يحدث نتيجة لوجود شوائب أو لوجود عناصر تضاف إلى المواد الأساسية كمادة لصنع سبيكة معينة.

ومن أنواع الخلل النقطي كالتالي:

الفجوات      خلل سكوتكس      المواقع الاقترامية      خلل فرينكل.

### الفجوات:

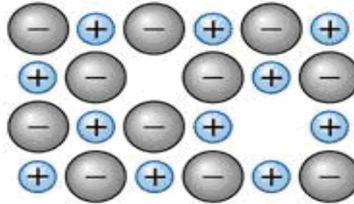
الفجوة هي غياب ذرة أو ذرات عن مكانها الطبيعي وتتكون الفجوات عادة أثناء عمليات تجمد المعدن ويسمى هذا النوع من العيوب بعيوب شوتكي ( Schottky defect) الشكل (1).



الشكل (1) الفجوات

خلل سكوتكس:

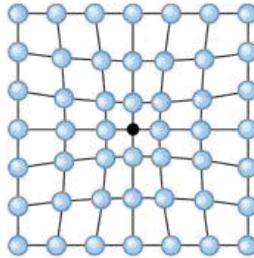
هذا النوع من الخلل يشابه الفجوة ولكنه يظهر في المركبات التي يجب أن تحافظ على توازن الشحنات كما في الشكل (2).



الشكل (2) خلل سكوتكس

المواقع الاقترامية:

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 البيئي في الشبكة البللورية.

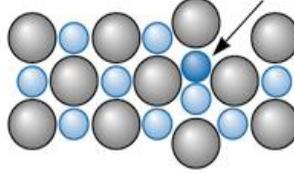


الشكل (3) المواقع الاقترامية

خلل فرينكل:

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

والتركييب البلورية ذات الرص المحكم تحتوي على عدد قليل من الاقحامات 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

### الانخلاعات الخطية (الخلل الخطي): (Dislocation (line defect))

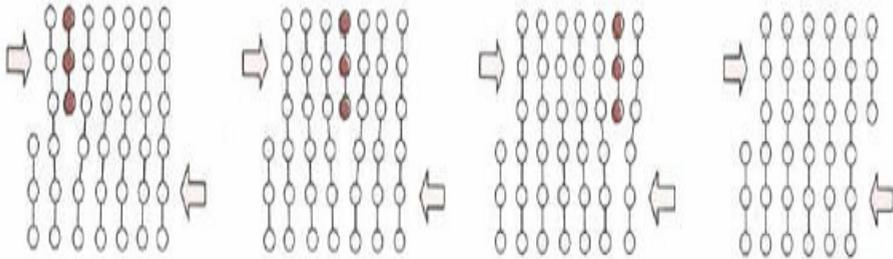
تنقسم أنواع الانخلاعات إلى نوعين أساسيين

الانخلاع الطرفي Edge dislocation

الانخلاع اللولبي Screw dislocation

الانخلاع الطرفي:

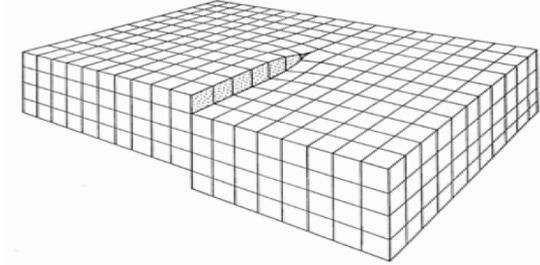
الانخلاع الطرفي الشكل (5) هو عبارة عن اختلال في خط مستقيم في الشبكة البلورية ،وجود هذا الخط بهذا الشكل يكون مناطق اختلال على جانبي خط الانخلاع dislocation-line نتيجة لهذا الاختلال تكون الذرات مضغوطة ومناطق أخرى تكون فيها الذرات في حالة شد ، لذا تكون منطقة الانخلاع منطقة زيادة في الطاقة ، ينتج عن هذه 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  $(T)$  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 البلورية إلى إجهاد قص كما في الشكل (6)، فيرتفع جزء من الشبكة البلورية وينخفض الجزء الآخر من الشبكة البلورية والخط الفاصل بين الانخفاض والارتفاع يسمى بمستوى الانزلاق وتنتج حالة من التوتر نتيجة لوجود حالة شد وحالة ضغط.

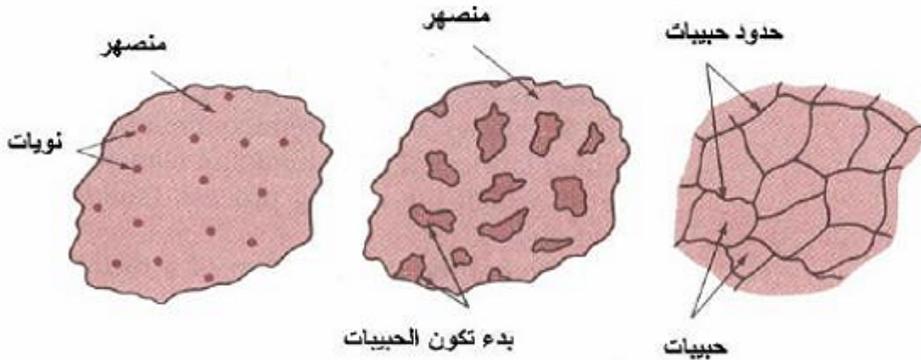


الشكل (6) الانخلاع اللولبي

## 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 متجهًا 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 اعتماداً أساسياً على حجم الحبيبة. صغر حجم الحبيبة يعني أن عدد الحبيبات يكون كثيراً وبالتالي يزيد كمية حدود الحبيبات، صغر حجم الحبيبة يقلل من المسافة التي يتحركها الانخلاع وبالتالي تزيد المتانة ، ومعادلة هول - بتش (Hall-Pitch) تصف ذلك:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

حيث:

$\sigma_y$  : إجهاد الخضوع

$\sigma_0, k$  : ثابتان يختلفان باختلاف المادة

$d$  : متوسط قطر الحبيبة

### تكوين الحبيبة:

تتكون الحبيبة أثناء تجمد المعدن وذلك حسب المراحل الآتية:

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

**ثانياً** يحدث نمو لكل نواة بإضافة مزيداً 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 بطئاً يكون عدد الأنوية قليل وبالتالي حجم الحبيبة كبير أما في حالة التبريد السريع يكون عدد الأنوية كبير وبالتالي حجم الحبيبات صغير.

# **الباب الثاني**

## **المعادن الحديدية**

### **Ferrous Metals**



# الفصل الأول

## المعادن الحديدية

### الحديد النقي:

الحديد النقي الخالص هو معدن صلب ذو خاصية مغناطيسية لونه فضي وهو لين للطرق والسحب والانشاء و ذو متانة عالية نسبياً ( $62 \text{ kg/mm}^2$ ). درجة انصهار الحديد تبلغ  $1538^\circ\text{C}$  ودرجة غليانه تبلغ  $2450^\circ\text{C}$ .

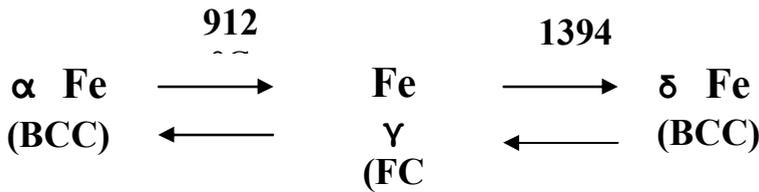
الرمز الكيميائي للحديد هو (Fe) وهو لا يصدأ في الهواء الجاف ولكنه يصدأ بسرعة في الهواء الرطب المحتوي على ثاني أكسيد الكربون مكوناً أكسيد الحديد المائي  $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  المعروف بصدأ الحديد.

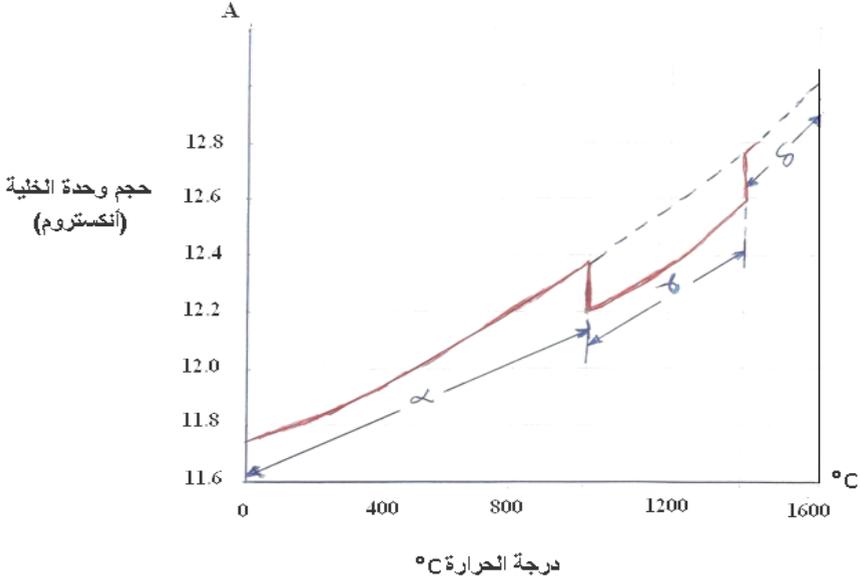
### الحديد وخاصية التآصل: Allotropic

يملك الحديد النقي خاصية تعرف بالتآصل (الألوتروبك) وهي أنه يتحول من شكل بلوري إلى آخر تبعاً لارتفاع وانخفاض درجة الحرارة. فهو يوجد في ثلاث أشكال بلورية يرمز لها بالأحرف اليونانية ألفا ( $\alpha$ ) وقاما ( $\gamma$ ) ودلتا ( $\delta$ ).

الحديد من درجة حرارة الغرفة وحتى درجة الحرارة  $912^\circ\text{C}$  له البناء البلوري المكعب المتمركز الجسم (BCC) ويعرف بالحديد ألفا ( $\alpha$ ). أما بعد  $912^\circ\text{C}$  إلى  $1394^\circ\text{C}$  فتتغير البنية البلورية إلى نوع المكعب المتمركز الأوجه (FCC) ويعرف بالحديد قاما ( $\gamma$ ). وبعد الدرجة  $1394^\circ\text{C}$  وحتى درجة الانصهار يحدث تحول تآصلي آخر ويتحول البناء البلوري للحديد إلى البنية البلورية للمكعب المتمركز الجسم مرة أخرى ويعرف بالحديد دلتا ( $\delta$ ) وهو شبيه بالحديد ألفا لكن بطول ضلع مكعب أكبر.

تتم كل التغيرات التآصلية والحديد في الطور الصلب ويتبع ذلك تغير في حجم الحديد حيث أن البنية (BCC) ذات رص غير محكم والبنية (FCC) ذات رص محكم.





الشكل 5.1: تأثير التحولات الأتروبية على تمدد الحديد النقي

### الحديد الصناعي:

الحديد مثل بقية المعادن لا يستخدم في صورته النقية إلا في الأحوال التي تتطلب جودة التوصيل للكهرباء أو المطيلية العالية أو المقاومة للتآكل في الصناعات الحساسة. فهذه الخواص تكون في أحسن حالاتها في المعادن النقية. إلا أن الخواص الميكانيكية الأخرى مثل مقاومة الشد والخضوع والصلادة تتحسن كثيراً في حالة السبائك.

يمكن تعريف الحديد الصناعي بأنه سبيكة Alloy من الحديد والكربون نسبة الحديد فيها حوالي 95% أو أكثر ويحتوي الحديد الصناعي على عناصر أخرى فلزية أو لافلزية منها السيلكون والمغنسيوم والفسفور والكبريت وغيرها بنسب أقل. يشمل الحديد الصناعي على كل من الحديد الزهر Cast iron والفولاذ (الصلب) Steel بأنواعه المختلفة.

### منحنى التوازن الحراري للحديد والكربون: Iron-Carbon Equilibrium diagram

الخواص الميكانيكية تعتمد على خواص الطور أو الأطوار المكونة للسبائك وعلى الطريقة التي تتألف بها هذه الأطوار لتكون السبيكة المعدنية. ويتم ذلك بالرجوع لمخطط التوازن الحراري للسبيكة المعينة. وهو عبارة عن رسم بياني يمثل ثلاث أشياء هي في حالة مخطط الحديد والكربون عبارة عن:

1. نسبة الكربون في السبيكة وتمثل في المحور الأفقي.
  2. درجة الحرارة وتمثل في المحور الرأسي.
  3. الطور الناتج من وجود عنصري السبيكة عند درجة الحرارة المحددة.
- وهذا المخطط أنشأ نتيجة لعمل مختبري شاق وبمساعدة أفران متحكم فيها حرارياً وأجهزة إلكترونية دقيقة ويتم فيه صهر السبيكة ثم تبريدها ببطء كافي لضمان تمازج مكونات السبيكة. ويستفاد منه في:
- أ. معرفة البنية والحالة الفيزيائية للسبيكة عند أي درجة حرارة.
  - ب. التنبؤ بدقة حول تأثير المعالجات الحرارية على السبيكة.

### أطوار الحديد والكربون:

بالرجوع لمخطط التوازن الحراري للحديد والكربون كما في الشكل (5.3) نجد أن الكربون له قابلية الذوبان في الحديد بنسب متغيرة حسب الصورة التآصلية للحديد (البنية البلورية) وحسب درجة الحرارة.

أكبر نسبة لذوبان الكربون في الحديد ألفا هي (% 0.022 كربون) عند درجة الحرارة  $727^{\circ}\text{C}$  وتقل هذه النسبة مع انخفاض درجة الحرارة حتى تصل إلى (% 0.006 كربون) عند درجة حرارة الغرفة ويطلق على المحلول الصلب (السبيكة) الناتج من ذوبان الكربون في الحديد ألفا الفيرايت Ferrite ويرمز له بالرمز ( $\alpha$ )، ويمكن اعتباره يمائل الحديد النقي من ناحية الخواص (لانخفاض نسبة الكربون).

أما أقصى نسبة لذوبان الكربون في الحديد قاما فتبلغ (% 2.14 كربون) عند درجة الحرارة  $1147^{\circ}\text{C}$  ويسمى المحلول الصلب الناتج من ذوبان الكربون في الحديد قاما بالأستونايت Austenite ويرمز له بالرمز ( $\gamma$ ).

أقصى نسبة لذوبان الكربون في الحديد دلتا تبلغ (% 0.08 كربون) وتحدث عند درجة الحرارة  $1493^{\circ}\text{C}$ . ويسمى المحلول الصلب الناتج بِدلتا فيرايت Delta-ferrite ويرمز له بالرمز ( $\delta$ ). أما كبريد الحديد  $\text{Fe}_3\text{C}$  فهو مركب كيميائي ناتج عن تفاعل الكربون مع الحديد بنسبة ثابتة (% 6.7) ويسمى السمنتايت Cementite ويمتاز بالصلادة العالية لكنه قصفي Brittle.

### نقاط التحول الحرج في مخطط الإيزان للحديد والكربون:

#### الأيوكتيك: Eutectic

مشتقة من كلمة يونانية وتعني القدرة على الانصهار بسهولة، وهي في نظام الحديد والكربون تحدث عندما تكون نسبة الكربون % 4.3 (في منطقة الحديد

الزهر) عند تبريد المنصهر في الظروف الإتزانة عند درجة الحرارة  $1147^{\circ}\text{C}$  وينتج عن ذلك محلول صلب مكون من الأستنايت (V) وكربيد الحديد أي السمنتايت (تحول من المصهور إلى طورين صلبين).  
وباستعمال قانون الرافعة لإيجاد نسبة الأستنايت والسمنتايت في الصلب عند نقطة الأيوكتيك:

$$\text{Austeni} = \frac{6.7 - 4.3}{6.7 - 2.14} = 53 \%$$

$$\text{Cementite \%} = 100 - 53 = 47 \%$$

#### الأيوكتويد: Eutectoid

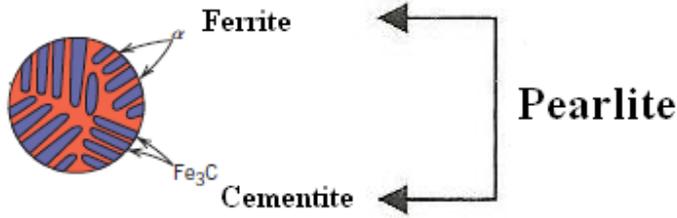
وهو عبارة عن مزيج ميكانيكي من طورين يحدث في نظام الحديد والكربون عندما تكون نسبة الكربون  $0.76\%$  تقريباً عند درجة الحرارة  $727^{\circ}\text{C}$  وينتج عن ذلك تحول الأوستنايت الصلب (طور واحد) إلى محلول ميكانيكي صلب يتكون من طورين فيرايت و سمنتايت.



$$\text{Ferri} = \frac{6.7 - 0.76}{6.7 - 0.022} * 100 = 89$$

$$\text{Cementite \%} = 100 - 89 = 11 \%$$

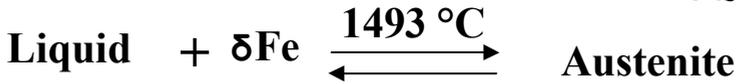
إذن يتكون الأيوكتويد من مزيج ميكانيكي متلاحم من  $89\%$  فيرايت و  $11\%$  سمنتايت (كربيد الحديد) على شكل بناء شرائحي (طبقات متتالية). ويسمى هذا الأيوكتويد الشرائحي بالبيرليت Pearlite (شبيه اللؤلؤ) لأنه يسبب انكسار الضوء ويحلله إلى ألوان الطيف المختلفة.



الشكل (2) بنية مجهرية لحبيبات البيرلايت

البروتكتويد: **Protectoid**

هو التحول الذي يحدث عند درجة الحرارة  $1493\text{ }^{\circ}\text{C}$  بنسبة كربون  $0.18\%$  ويتم فيه تحول الطور السائل المنصهر والطور الصلب دلتا فيرايت (طورين) إلى أستنايت (طور واحد).



عند نقطة البروتكتويد (الشكل (4.4)) تكون نسبة السائل والدلتا فيرايت كالآتي:

$$\delta\text{Fe} = \frac{0.55 - 0.18}{0.55 - 0.08} = 79\%$$

إما الطور الصلب أستنايت فيكون نقي بنسبة  $100\%$ .

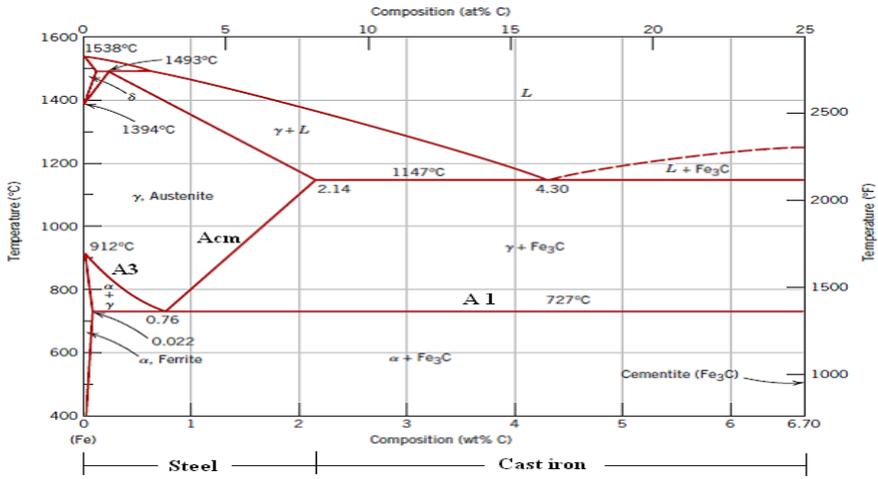
$$\text{Liquid } \% = 100 - 79 = 21\%$$

### الخطوط الحرجة في مخطط الاتزان للحديد الكربون:

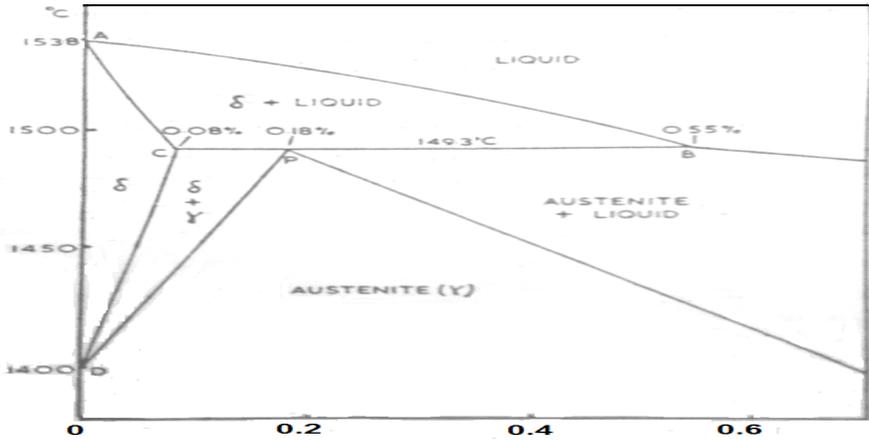
**الخط A1:** يمثل خط التحول الأيوتكتويدي وهو خط ترسب البيرلايت ويتم عند درجة حرارة ثابتة وهي  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  لكل نسب الكربون ويسمى بالخط الحرج الأدنى Lower critical line أو خط الأيوتكتويد.

**الخط A3:** يمثل خط ترسب الفيرايت من الأوستنايت ويسمى الخط الحرج الأعلى Upper critical line ويلاحظ على هذا الخط أن نسبة الكربون في الأوستنايت تزداد بأنخفاض درجة الحرارة. وعنده يبدأ الفيرايت في الترسيب من الأوستنايت على الحدود الحبيبية.

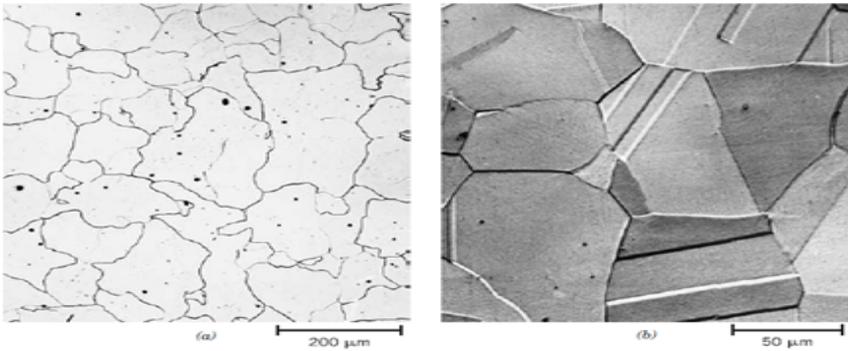
**الخط Acm:** ويمثل خط ترسب السمنتايت (كربيد الحديد) من الأوستنايت وفيه نسبة الكربون في الأوستنايت تزداد بازدياد درجة الحرارة.



الشكل (3) مخطط التوازن الحراري للحديد والكربون



الشكل (4) منطقة البروتكتويد

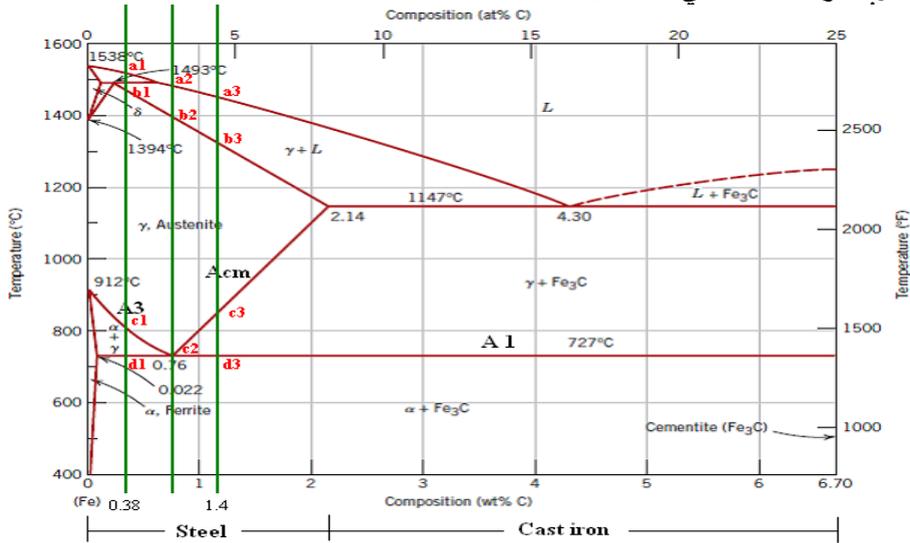


الشكل (5) صورة مجهرية للفيريت (a) والاسنتايت (b)

## الفصل الثاني الصلب الكربوني العادي Plain Carbon Steel

### مقدمة:

الصلب الكربوني عبارة عن سبيكة من الحديد والكربون تحتوي على نسبة كربون 2.14% كحد أقصى وذلك بالإضافة إلى وجود بعض العناصر الأخرى المتبقية من مرحلة الاستخلاص كشوائب مثل الكبريت والفسفور والسيلكون والمنجنيز. لمعرفة البنية للصلب والخواص الناتجة سيتم فيما يلي تتبع التحولات التي تحدث في بنية ثلاث أنواع من الصلب عند تبريدها في حالة الاتزان من الانصهار حتى درجة حرارة الغرفة وهي تحتوي على نسبة كربون 0.38% و 0.76% و 1.4% على التوالي وذلك بالاستعانة بمنحنى التوازن الحراري الكامل للحديد والكربون الشكل (1) وبأجزاء منه كما في الأشكال التالية:



الشكل (1) مخطط التوازن الحراري للحديد والكربون

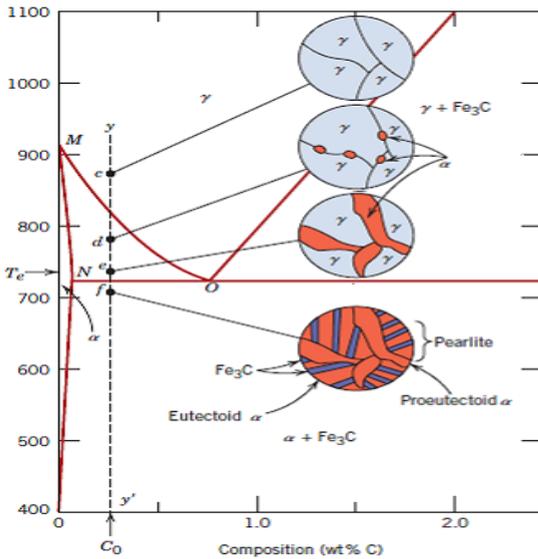
أولاً: سبيكة تحتوي على 0.38% كربون:

هذه السبيكة تبدأ في التجمد عندما تصل النقطة  $a_1$  عندها يتكون المحلول الصلب المتجمد من الكربون المذاب في بنية الحديد المكعب متمركزة الوجه FCC المعروف بالأستنايت (γ) ويستمر التجمد حتى يصل النقطة  $b_1$  والتي يكون كل السائل تحول للأستنايت.

وباستمرار عملية التبريد البطئ وعند درجة الحرارة  $C_1$  عند الخط الحرج A3 (درجة الحرارة الحرجة العليا) فإن البنية الداخلية تبدأ في التحول من البنية FCC إلى بنية المكعب متمركز الجسم BCC وبالتالي فإن بلورات صغيرة ذات بنية مكعب متمركز الجسم تبدأ في الانفصال من الأستنايت. هذه البلورات تحتوي على نسبة قليلة من الكربون أقل من 0.036% تسمى الفييريت.

وباستمرار عملية التبريد المتزن فإن بلورات الفييريت تنمو على حساب الأستنايت وبمرور الوقت تصل درجة الحرارة إلى النقطة  $d_1$  (درجة الحرارة الحرجة السفلى للصلب  $727^\circ\text{C}$ )، عند هذه الدرجة لا يستطيع الأستنايت أن يحتفظ بالكربون لذلك فإن خفض درجة الحرارة يؤدي إلى ترسب الكربون المنفصل من الأستنايت في صورة سمنتايت وفي نفس الوقت يستمر انفصال الفييريت. ونجد أن الفييريت و السمنتايت يكونان بناء شرائح (طبقات متتالية) حتى يتم إستهلاك كل الأستنايت، هذه البنية والتي تحتوي على 0.76% كربون تسمى البيرلايت Pearlite.

عند الوصول إلى درجة حرارة الغرفة تكون البنية الداخلية لهذه السبيكة حوالي 50% فيرايت و 50% بيرلايت. أي أن الصلب الذي يحتوي على أقل من 0.76% كربون يتحول من الأستنايت إلى خليط من الفييريت والبيرلايت ويبدأ التحول عند درجة الحرارة الحرجة العليا عند الخط A3 وينتهي عند درجة الحرارة الحرجة السفلى  $727^\circ\text{C}$  عند الخط A1 وتعتمد الكميات النسبية للفييريت والبيرلايت على ما يحتويه الصلب من كربون.



**Figure 6.2a** Schematic representations of the microstructures for an iron-carbon alloy of hypoeutectoid composition  $C_0$  (containing less than 0.76 wt% C) as it is cooled from within the austenite phase region to below the eutectoid temperature.

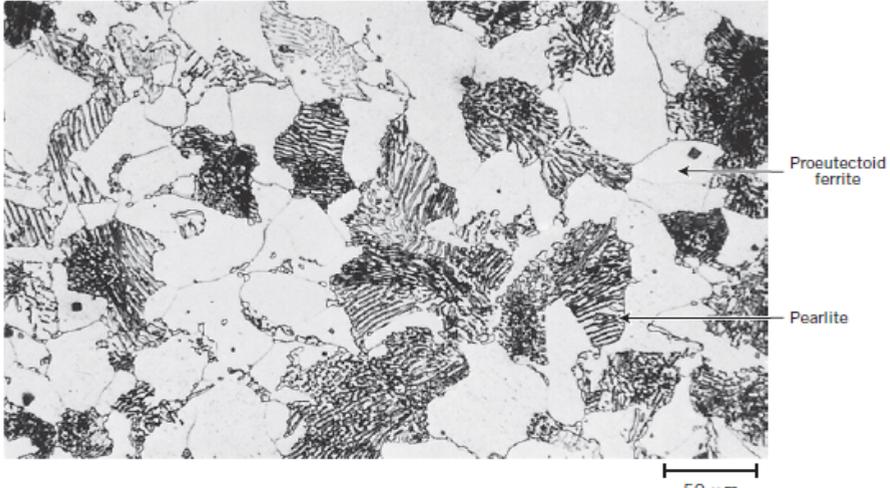


Figure 6. 2b Photomicrograph of a 0.38 wt% C steel having a microstructure consisting of pearlite and proeutectoid ferrite.

الشكل (2) مراحل التبريد المتوازن والبنية المجهرية للصلب قبل الأيونكتويد  
ثانياً: سبيكة تحتوي على 0.76% كربون:

هذه السبيكة تبدأ في التجمد عند درجة الحرارة  $a_2$  وهي حوالي  $1470^\circ\text{C}$  ويترسب الأستنايت. وعند إنتهاء التجمد عند النقطة  $b_2$  فإن البنية الداخلية تكون عبارة عن حبيبات من الأستنايت غير متجانسة تحتوي بصورة عامة على 0.76% كربون. عندما تصل درجة الحرارة إلى درجة الحرارة الحرجة الدنيا ( $727^\circ\text{C}$ ) يبدأ الأستنايت في التحول كلية إلى بيرلايت، وبالتالي تكون البنية النهائية بيرلايت 100%.

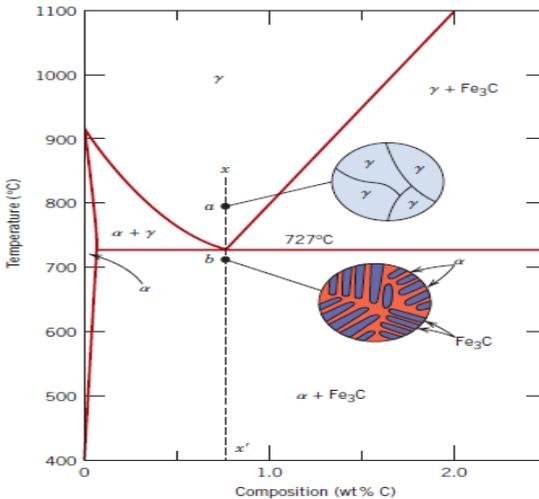
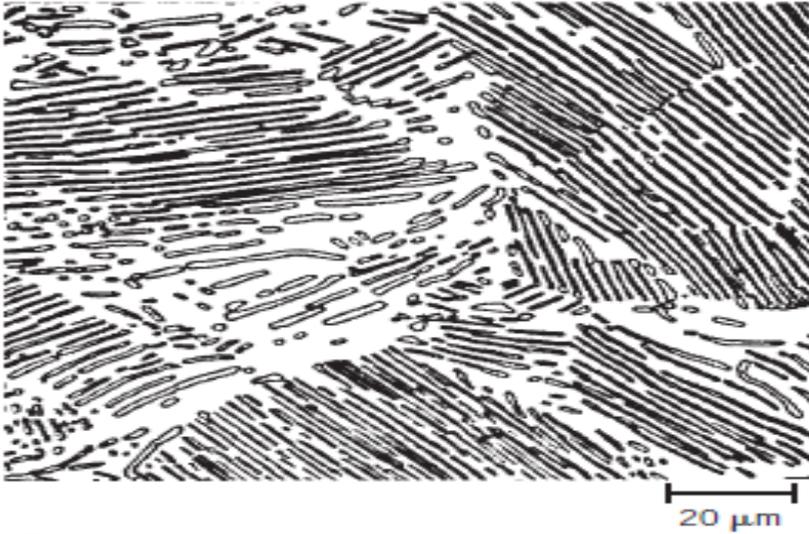


Figure 6.3a Schematic representations of the microstructures for an iron-carbon alloy of eutectoid composition (0.76 wt% C) above and below the eutectoid temperature.



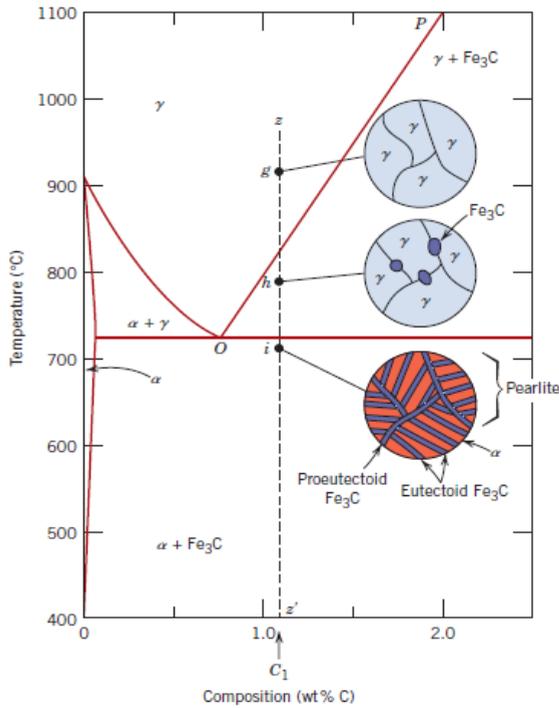
**Figure 6.3 b** Photomicrograph of a eutectoid steel showing the pearlite microstructure consisting of alternating layers of  $\alpha$ -ferrite (the light phase) and  $Fe_3C$  (thin layers most of which appear dark).

الشكل (3) مراحل التبريد المتوازن والبنية المجهرية للصلب الأيوتكتويد

ثالثاً: سبيكة تحتوي على 1.4% كربون:

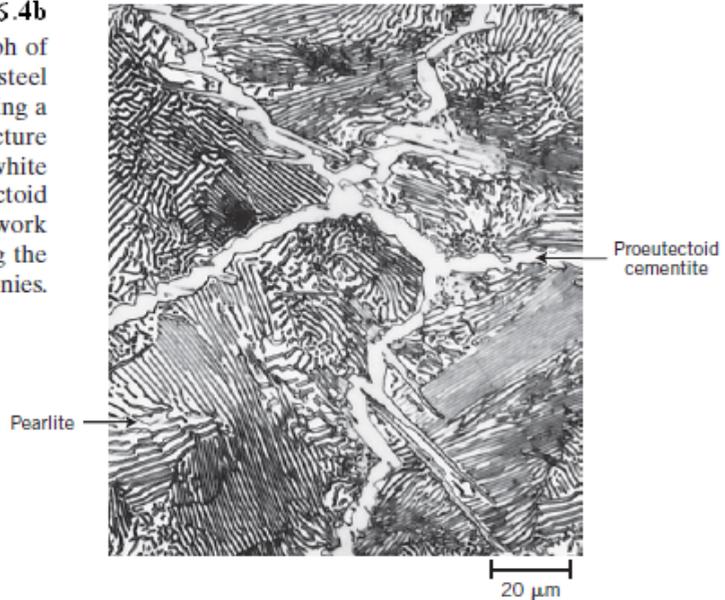
في حالة التجمد المتزن لسبيكة الصلب التي تحتوي على 1.4% كربون فإنه يبدأ في التجمد عند النقطة  $a_3$  لتتكون حبيبات من الأستنايت. وبإنخفاض درجة الحرارة يتحول المنصهر المتبقي إلى أستنايت عند  $b_3$ . ونتيجة لإنخفاض درجة الحرارة وعند النقطة  $c_3$  فإن إبر من السمنتايت تبدأ في الترسيب على حدود حبيبات الأستنايت وبالتالي تنخفض نسبة الكربون المتبقي في الأستنايت. وعند انخفاض درجة الحرارة إلى  $727^\circ C$  فإن الأستنايت المتبقي يبدأ في التحول إلى بيرلايت وتكون البنية الداخلية النهائية عبارة عن سمنتايت إبتدائي و بيرلايت.

بصورة عامة أي صلب يحتوي على أكثر من 0.76 % كربون تكون بنيته الداخلية عبارة عن سمنتايت و بيرلايت.



**Figure 6.4a** Schematic representations of the microstructures for an iron-carbon alloy of hypereutectoid composition  $C_1$  (containing between 0.76 and 2.14 wt% C), as it is cooled from within the austenite phase region to below the eutectoid temperature.

**Figure 6.4b** Photomicrograph of a 1.4 wt% C steel having a microstructure consisting of a white proeutectoid cementite network surrounding the pearlite colonies.



الشكل (4) مراحل التبريد المتوازن والبنية المجهرية للصلب بعد الأيوتكتويد

يسمى الصلب الكربوني الذي يحتوي على نسبة كربون أقل من % 0.76 بالصلب قبل الأيوكتويد Hypoeutectoid، ويسمى الصلب الذي يحتوي على أكثر من % 0.76 كربون بالصلب بعد الأيوكتويد Hypereutectoid أما الصلب الذي يحتوي على % 0.76 كربون فيسمى بصلب الأيوكتويد Eutectoid.

إذا تم تبريد قطعة من الصلب نسبة الكربون فيها معلومة يكفي للتحقق من حالة التبريد المتوازن (البطيئ نسبيا) أن البنية الداخلية تكون واحد من الآتي:

1. الصلب الذي يحتوي على أقل من % 0.006 كربون تكون بنيته الداخلية % 100 فيرايت.

2. الصلب الذي يحتوي على نسبة كربون تقع بين % 0.006 - % 0.76 تكون بنيته الداخلية عبارة عن الفيرايت والبيرلايت وتختلف نسبتها تبعاً لنسبة الكربون.

3. الصلب الذي يحتوي على % 0.76 كربون تكون بنيته الداخلية كلية من البيرلايت.

4. الصلب الكربوني المحتوي على نسبة كربون أكبر من % 0.76 تكون بنيته الداخلية عبارة عن سمنايت و بيرلايت.

### الشوائب في الصلب:

تحتوي معظم أنواع الصلب العادي على نسبة من الشوائب المتخلفة أثناء عملية الإختزال وهي عبارة عن عناصر مثل المنجنيز والسيلكون والكبريت والفسفور. ويعتمد تأثيرها على الخواص الميكانيكية للفولاذ على طريقة توزيعها في البنية الداخلية للصلب.

### المنجنيز:

قابل للذوبان في الأستنايت والفيرايت مكوناً محاليل صلبة كما يكون كبريد ثابت  $Mn_3C$  يساعد في زيادة عمق التقسية كما يحسن مقاومة ومتانة السبيكة لكن يجب ألا تتعدى نسبته % 0.3 وذلك لقابليته لتكون شروخ التقسية خاصة عند التقسية بالماء.

### السيلكون:

يكسب الصلب سيولة ويجعله مناسباً لإنتاج المسبوكات ولكنه له قابلية لتفكيك السمنايت  $Fe_3C$  وتحويله إلى جرافيت (كربون حر).

### الفسفور:

يكون فسفور الحديد الهش  $Fe_3P$  مما يؤدي إلى إضعاف مقاومة الصدمات وبالتالي يقلل من متانة المادة لكن وجوده إلى حد ما يزيد من عمق التقسية.

## الكبريت:

هو أكثر الشوائب ضرراً بالصلب لأنه يكون كبريتيد الحديد الهش والذي يذوب في الصلب المنصهر ولكن أثناء التجمد تقل قابليته للذوبان و يترسب على الحدود الحبيبات، ونسبة لدرجة إنصهاره المنخفضة فإنه يعرض الصلب للتفتت أثناء تشكيله على الساخن كذلك يكون عائقاً عند استخدام المنتج وعند التشكيل على البارد وذلك لهشاشته لذا فللكبريت ما يعرف بظاهرة القصور على البارد وعلى الساخن Cold and hot shortness.

في الصلب يجب ألا تتعدى نسبة الكبريت % 0.05 ، وإزالة تأثيره تضاف نسبة إضافية من المنجنيز وذلك لتكوين كبريتيد المنجنيز الغير قابل للذوبان في الصلب المنصهر والذي يطفو في شكل خبث في سطح المصهور.

## استخدامات الصلب الكربوني:

يمكن تصنيف الصلب الكربوني من حيث الغرض إلى الأنواع التالية:

### الصلب منخفض الكربون: Low carbon steel

وهو يحتوي على نسبة كربون أقل من % 0.15 وتتكون البنية الداخلية له من نسبة عالية من الفيريت ونسبة قليلة من البيرلايت. ويمتاز باللدانة العالية وسهولة التشكيل والتصنيع، وله مقاومة شد تبلغ  $280N/mm^2$  ، ويستعمل في صناعة مسامير البرشام والأسلاك والصفائح وكل الأجزاء التي يتم تشكيلها على البارد والتي لا تحتاج إلى متانة عالية. وبالرغم من أنه لا يتمتع بصلادة عالية إلا أنه يمكن زيادة صلادته السطحية بالتصليد السطحي والكربنة.

### الصلب الطري: Mild steel

نسبة الكربون فيه بين % 0.15 حتى % 0.3 وتزيد فيه نسبة البيرلايت بزيادة نسبة الكربون، لذا فإن مقاومة الشد تزداد بإزيد نسبة الكربون. يستخدم هذا الصلب في صناعة صلب البناء (السيخ والكمز) والأشياء التي يتم تصنيعها بالحدادة.

### الصلب متوسط الكربون: Medium carbon steel

نسبة الكربون فيه بين % 0.3 حتى % 0.6 وتغلب عليه البنية الشرائحية للبيرلايت ويمتاز بالمتانة العالية ( $700N/mm^2$ ) ودرجة صلادته عالية وله قابلية للتصليد أعلى من الصلب المنخفض الكربون وذلك نتيجة لإرتفاع نسبة الكربون فيه ويعتبر هذا الصلب صعب التشكيل على البارد ويستخدم في تصنيع الأجزاء التي تتطلب متانة عالية نسبياً مثل أعمدة المحاور والتروس وأزرع التوصيل وغيرها من الأجزاء التي تتعرض لحمل اصطدام مفاجئ.

## الصلب عالي الكربون: High carbon steel

نسبة الكربون فيه بين 0.75 % حتى 0.9 % وتتكون بنيته الداخلية من نسبة عالية من البيرلايت ونسبة منخفضة من الفيريت و السمنتايت ويمتاز هذا الصلب بدرجة الصلادة ومقاومة الشد العاليتين، ويستخدم في تصنيع المعدات التي تتطلب متانة عالية مثل المطارق ومفاتيح الربط والأدوات اليدوية الأخرى.

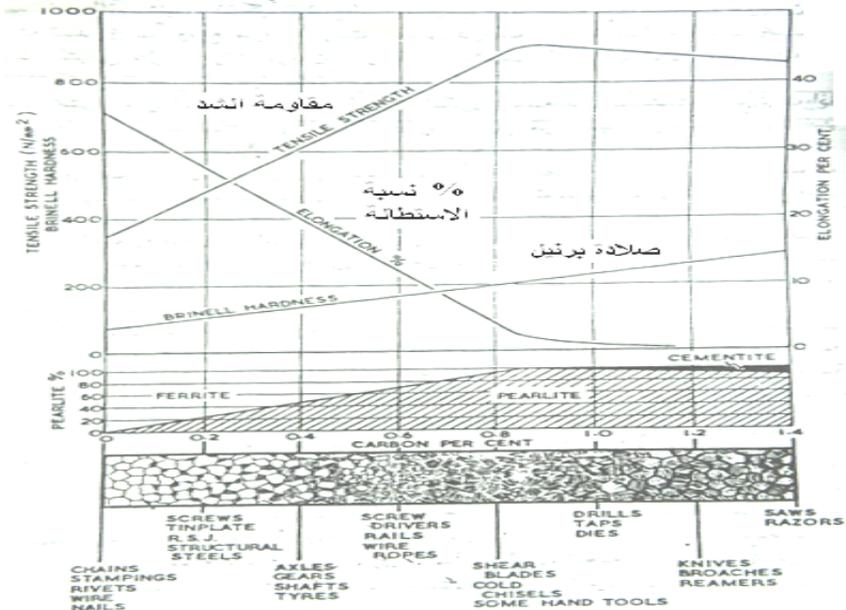
### الصلب العدد: Tool steel

نسبة الكربون فيه بين 0.9 % حتى 1.5 % والبنية الداخلية له تتكون من البيرلايت والسمنتايت. إستخداماته تتضمن عدد القطع لماكينات التشغيل وقوالب السباكة وقوالب التشكيل (الإسطمبات) وغيرها من الإستخدامات التي تتطلب صلادة عالية ومتانة عالية ومقاومة لدرجات الحرارة العالية.

### العلاقة بين نسبة الكربون والخواص الميكانيكية للصلب:

تزداد الصلادة بإزدياد نسبة الكربون، بينما تزداد مقاومة الشد إلى أن تصل إلى حد معين ثم تقل وذلك نسبة للمهشاشة الناتجة من ترسب الكربون الحر في شكل جرافيت.

زيادة نسبة الكربون تقل اللدانة والإستطالة (المطيلية والطروقية).



الشكل (5) العلاقة بين نسبة الكربون، البنية المجهرية والخواص الميكانيكية للصلب الكربوني

## الفصل الثالث

### المعالجات الحرارية للفلوآذ (الصلب الكربوني)

#### الجزء الأول

#### The Heat- Treatment of Steel (1)

##### مقدمة:

منحنى الإتزان الحراري للحديد والكربون الذي تم التطرق إليه سابقاً تم إنشائه في ظرف مثالية (إتزانية) ذلك بخلاف للظروف العادية التي يتعرض إليها المنتج أثناء عمليات التصنيع وبعد ذلك في مراحل الإستخدام وذلك ما توضحه المقارنة في الجدول التالي:

الظروف العادية أثناء وبعد التصنيع	الظروف الإتزانية (المثالية)
توجد إجهادات (شد - ضغط - لي - قص ... إلخ)	لا يوجد إجهاد
يوجد إجهادات حرارية	لا يوجد إجهادات حرارية
تعتمد البنية والخواص على نسبة الكربون	تعتمد البنية والخواص على نسبة الكربون
معدل التبريد بطيء جداً أو سريع جداً	معدل التبريد متوازن
شكل الحبيبات غيرمنتظم (صغيرة جداً أو كبيرة جداً)	شكل الحبيبات منتظم
تظهر بنيات أخرى غير البيرلايتية	البنية بيرلايتية (فيرايت - بيرلايت - سمنايت)

##### المعالجات الحرارية:

سبائك الحديد والكربون تعد من السبائك الهندسية القليلة التي يمكن معالجتها حرارياً للإفادة من تغيير خواصها الميكانيكية وذلك بسبب التغيرات التي تحدث في البنية الداخلية والتي تتم في الحالة الصلبة.

المعالجات الحرارية (بصفة عامة) هي سلسلة عمليات تكون العملية الأساسية فيها هي تسخين السبيكة لدرجة حرارة معينة لفترة زمنية معينة ومن ثم التبريد بمعدلات معلومة وذلك لتحقيق واحد أو أكثر من الأهداف التالية:

1. إزالة الإجهادات المتبقية Residual stresses الناشئة عن التشكيل أو الصب أو اللحام.
  2. تحسين إحدى الخواص الميكانيكية (زيادة المطيلية أو المتانة أو مقاومة الشد أو الصلادة).
  3. الحصول على تركيب دقيق معين يعطي خواص معينة (غير الميكانيكية) مرغوب فيها لغرض معين.
- ويمكن تبين ثلاث مراحل في أي سلسلة عمليات معالجة حرارية وهي:
1. تسخين المادة إلى درجة حرارة يتم تحديدها مسبقا.
  2. التشريب الحراري **Soaking** لفترة زمنية محددة.
  3. التبريد وقد يكون بطيئاً أو سريعاً.
- بناءً على الهدف المراد من المعالجة الحرارية والظروف المحددة للمراحل الثلاث أعلاه يمكن تصنيف المعالجات الحرارية التي تتم للفولاذ على النحو التالي:
1. التخمير أو التلدين. **Annealing**
  2. المعادلة أو المعايرة. **Normalizing**
  3. التقسية أو التصليد. **Hardening**
  4. المراجعة أو التطويع. **Tempering**
  5. التحولات عن درجات الحرارة الثابتة. **Isothermal transformation**
- وفي جميع هذه العمليات يسخن الصلب ببطء لدرجة حرارة معينة مع إعطاء فترة تم يبرد ويكون معدل التبريد هو العامل الذي يحدد البنية الداخلية الناتجة، ولا تعتمد البنية الداخلية النهائية على معدل التسخين على أساس أن ذلك يكون ببطء يكفي لكي تصل البنية الداخلية لحالة التوازن عند الوصول لدرجة الحرارة المحددة سلفاً. ويتراوح معدل التبريد الذي يحدد طبيعة البنية الداخلية النهائية ما بين التبريد المفاجئ وبين التبريد البطئ داخل الفرن.

### التخمير: Annealing

في عمليات التخمير يتم التبريد ببطء داخل الفرن من عمليات التخمير التي تجري للصلب إلى:

1. التخمير لإزالة الإجهادات **Stress-relief annealing**.
2. تخمير التكور **Spheroidising annealing**.
3. تخمير المسبوكات **Annealing of casting**.

### التخمير لإزالة الإجهادات: Stress-relief annealing

أثناء عمليات التشكيل على البارد للصلب الطري Mild steel (مثل عملية سحب الأسلاك) تحدث إجهادات داخلية مختزنة في المعدن، منها إجهادات ضغط في بعض المناطق ومنها إجهادات شد في مناطق أخرى كلها غير مرغوب فيها ويجب إزالتها، ويتم ذلك بواسطة تخمير إزالة الإجهادات وفيه يتم تسخين الصلب حتى درجة حرارة  $650^{\circ}\text{C}$  تقريباً وهذه الدرجة أعلى من درجة حرارة إعادة التبلور (درجة حرارة إعادة التبلور Recrystallisation للصلب الطري تساوي حوالي  $500^{\circ}\text{C}$ )، وبالتالي فإن عملية إعادة التبلور تَجَل accelerated وتتم في بضع دقائق.

إطالة عملية التخمير تؤدي إلى الإضرار بالخواص الميكانيكية وذلك لأنه على الرغم من زيادة المطيلية فإن المعدن يفقد متانته (انخفاض مقادير المقاومات وتحسين خواص المطيلية والتوصيل الحراري والكهربي..).

هذا النوع من التخمير يعطي المعدن طاقة حرارية تمكن ذراته من التحرك إلى مواضع أكثر استقراراً في الشبكة البلورية مما يقلل الإجهادات، وهو يتم في أفران مزودة بجو خامل **Inert atmosphere**.

### تخمير التكور: Spheroidising annealing

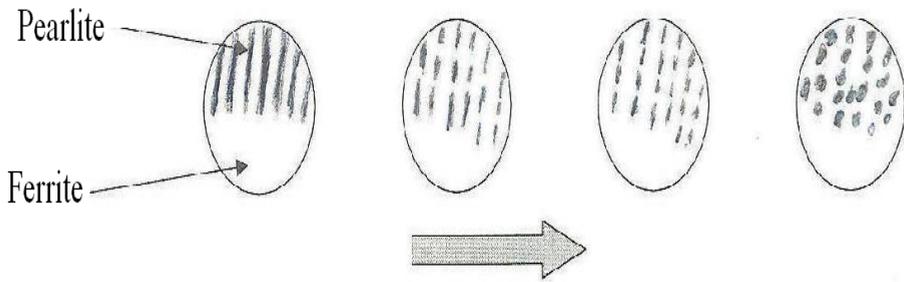
هذا النوع من التخمير يستخدم في تليين صلب العدد Tool steel وبعض أنواع الصلب السبائكي الذي يقسى في الهواء Air-Harding alloy steel وفي هذه الحالة يمكن سحب الصلب وتشغيله نسبياً بالقطع.

تتم عملية تخمير التكور بتخمير الصلب عند درجة حرارة بين  $650^{\circ}\text{C}$  –  $700^{\circ}\text{C}$  أي أقل مباشرة من الدرجة الحرجة السفلى (A1). عند هذه الدرجة لا تحدث تغيرات صنفية أساسية لكن نتيجة لتأثيرات الشد السطحي Surface-tension الذي يحدث عند درجة الحرارة فإن طبقات السمنتايت المكونة للبيرلايت تتحول إلى صورة متكورة بدلاً من الشرائحية بحيث يفقد البيرلايت الأيوتكتويدي طبيعته الشرائحية المميزة الشكل (7.1) ويكون المنتج النهائي عبارة عن جزئيات مستديرة من السمنتايت في أرضية من الفيررايت.

إذا كانت طبقات السمنتايت المكونة للبيرلايت غليظة نسبياً فإنها تحتاج إلى وقت أطول حتى تتجزأ ويؤدي ذلك إلى تكوين كريات كبيرة من السمنتايت وذلك يؤدي بدوره إلى تسليخ سطح المعدن أثناء التشغيل. للتغلب على تلك التأثيرات فمن المفضل إجراء نوع من التقسية للصلب قبل التخمير وذلك لتصغير حجم حبيبات

السمنتايت Refine مما يجعلها تتكور بسرعة أكبر عند التخمير وينتج عنها كريات صغيرة من السمنتايت. تساعد هذه الكريات الصغيرة ليس فقط في تحسين تشطيب السطح أثناء عمليات التشغيل بل أيضا على ذوبان جزيئات السمنتايت بسرعة عند إجراء عملية التقسية للعدد.

ملحوظة: عملية تخمير التكور تتم تحت درجة الحرارة السفلى (A1) لهذا السبب فإنه على الرغم من حدوث عملية إعادة التبلور إلا أنه لا يوجد تغير في الأصناف وتظل مكونات الفيرايت السمنتايت في البنية الداخلية خلال العملية. وتحديث عملية التكور نتيجة لتأثير قوى الشد السطحي.



الشكل (1) مراحل تكور السمنتايت البيرلايتي

### تخمير المسبوكات: Annealing of casting

في حالة السباكة الرملية إذا كان المسبوك كبيراً فإن معدل التبريد يكون بطيئاً بسبب تأثير القالب الرملي فتتخفف درجة الحرارة ببطء خلال منطقة الأستنايت حتى النقطة التي يبدأ عندها التحول إلى فيرايت و بيرلايت. عند تلك الدرجة تكون حبيبات الأستنايت كبيرة بدرجة ملحوظة. أما الفيرايت الذي ينفصل في هذه الأثناء وفقاً لمنحني التوازن فإنه يترسب أولاً على حدود حبيبات الأستنايت وبذلك فإنه يحدد البنية الداخلية النهائية وحجم حبيبات الأستنايت الأصلية. و يترسب الفيرايت المتبقي على طول مستويات بلورية Crystallographic plans معينة داخل الشبكة البلورية للأستنايت ويساعد ذلك على أن يأخذ الفيرايت ترسبات اتجاهية، وتعرف هذه البنية الداخلية ببنية فيدمان شتاتين Widmanstatten الشكل (7.2).

تؤدي الهيئة الشبكية التي يأخذها الفيرايت في بنية فيدمان شتاتين إلى عزل البيرلايت الأقوى إلى مناطق مستقلة مما يضر بالمتانة والمرونة. ولذلك فإن الخواص الأساسية لهذه البنية هي الضعف والهشاشة ويجب إزالتها بالمعالجة الحرارية.

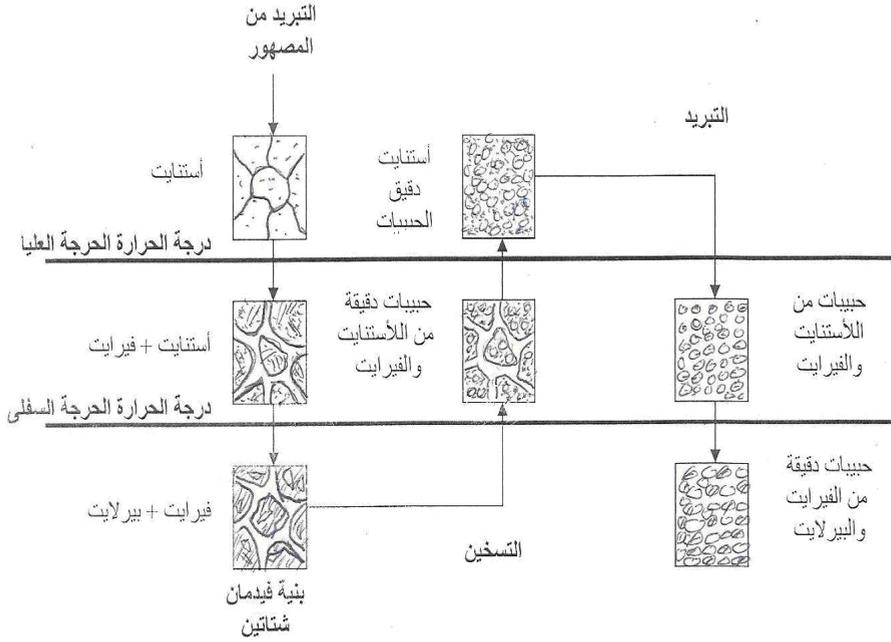
من أكثر المعالجات ملائمة للمسبوكات الكبيرة هي تسخينها ببطء حتى درجة حرارة تعلق حوالي  $40^{\circ}\text{C}$  من الدرجة الحرجة العليا (درجة حرارة التخمير تعتمد على نسبة الكربون (تناسب عكسي))، ومن ثم الإحتفاظ بها عند هذه الدرجة لفترة مناسبة تكفي فقط لتجانس الحرارة داخل المسبوك، ثم تبريده ببطء داخل الفرن. لفهم التغير الذي يحدث في البنية فإنه أثناء مرحلة التسخين وبوصول درجة الحرارة إلى الدرجة الحرجة السفلى ( $727^{\circ}\text{C}$ ) تتحول مناطق البيرلايت إلى أستنايت تكون حبيباته صغيرة جداً لذلك لأن كل حبيبة من البيرلايت تعطي عدداً من حبيبات الأستنايت الجديدة.

وبارتفاع درجة الحرارة تذوب شرائح الفيررايت التي تأخذ شكل فيدمان شتاتين في الأستنايت حتى تصل درجة الحرارة إلى الدرجة الحرجة العليا فتكون كل البنية من الأستنايت دقيق الحبيبات ويؤدي التبريد بعد ذلك إلى إعادة ترسيب الفيررايت ولكن نظراً لأن حبيبات الأستنايت الجديدة صغيرة فإن الفيررايت المترسب يكون موزعاً توزيعاً دقيقاً. وفي النهاية عندما تصل درجة الحرارة إلى الدرجة الحرجة السفلى فإن حبيبات الأستنايت الصغيرة المتبقية سوف تتحول إلى بيرلايت.

هذه المعالجة لا تحسن الخواص الميكانيكية المرتبطة بتصغير حجم الحبيبات (المرونة والمطيلية...) فقط بل تزيل أيضاً الإجهادات الميكانيكية التي تنشأ أثناء عملية الإنجماد Solidification في السباكة، كما أنها لا تؤثر تأثيراً كبيراً على مقاومة الشد الأقصى.

ملحوظة: التسخين الزائد over-heating أثناء التخمير لفترة طويلة داخل مجال الأستنايت يؤدي إلى نمو حبيبات الأستنايت مما يؤدي إلى تكون بنية مشابهة لبنية فيدمان شتاتين الأصلية لهذا يجب ألا يتعدى التسخين الدرجة المطلوبة وأن يبقى المسبوك داخل مجال الأستنايت لفترة تكفي فقط لتحويل كل البنية للأستنايت.

قد يؤدي التسخين الزائد بشدة كذلك إلى حدوث التأكسد أو الإحتراق لسطح المنتج (التفاعل مع الأكسجين الجوي) وتغلغل حبيبات الأكسيد لحدود الحبيبات مؤدية بذلك إلى انتزاع الكربون من السطح. هذا العيب لا يمكن إصلاحه بالمعالجات الحرارية، ولا يتم ذلك إلا بكشط المنتج. لمنع إحتراق المنتجات فإنها تخمر غالباً داخل صناديق من الحديد الزهر بداخلها جير ورمل وبرادة حديد أو مادة كربونية وذلك تبعاً لنسبة الكربون في المسبوك.



الشكل (2) البنية أثناء التجمد للمصبوك ومن ثم عملية التخمير (تسخين وتبريد)

### المعادلة أو المعالجة: Normalizing

عملية المعادلة شبيهة بتخمير المسبوكات من حيث درجة حرارة التسخين ولكن تختلف في طريقة التبريد. فبينما يتم التبريد في عملية التخمير داخل الفرن، فإن التبريد في المعادلة يتم خارج الفرن حيث يبرد الصلب في الهواء الساكن. تساعد عملية التبريد السريعة نسبياً على تحديد نمو الحبيبات (تكون أصغر) مما يجعل الخواص الميكانيكية للجزء المعادل أفضل. بالإضافة إلى ذلك فإن نعومة تشطيب السطح للجزء المعادل تكون أفضل. يعتمد نوع البنية الناتجة من المعادلة إلى حد كبير على سمك مقطع المنتج وذلك لتأثيره على معدل التبريد. فالمقاطع الرقيقة تعطي حبيبات أدق من المقاطع السمكية.

## الفصل الرابع المعالجات الحرارية للفلوآذ (الصلب الكربوني) الجزء الثاني

### The Heat- Treatment of Plain Carbon Steel (2)

#### مقدمة:

إذا تم إجراء مقارنة بين المعالجات الحرارية في الجزء الأول (التخمير والمعادلة) وتلك التي سيتم التطرق إليها في هذا الجزء الثاني (التقسية والمراجعة والتحويلات عند درجات الحرارة الثابتة) تتلخص المقارنة في الآتي:

التقسية والمراجعة والتحويلات عند درجات الحرارة الثابتة	التخمير والمعادلة
التبريد مفاجئ أو سريع يمنع حدوث التوازن الحراري	التبريد يكون بطيء بحيث تتاح للصلب الوصول لحالة التوازن
التبريد السريع يكون بنيات أخرى غير البيرلايتية	البنية المجهرية تكون بيرلايتية (فيرايت-بيرلايت-سمنتايت)
تزيد الصلادة	تحسن خواص المرونة والمطيلية للصلب

#### التقسية: Hardening

عندما يبرد الصلب الذي يحتوي على نسبة كافية من كربون بسرعة من درجة حرارة أعلى من الدرجة الحرجة العليا A3 (مجال الأستنايت) فإنه يصبح أكثر صلادة وتعرف هذه العملية بالتقسية.

بصورة عامة تتم التقسية بتسخين المنتج من الصلب لدرجة حرارة تزيد بحوالي 30 إلى 50 عن الدرجة الحرجة العليا ثم يبرد فجائياً في وسط ما يعطي سرعة التبريد المطلوبة. وتعتمد درجة الصلادة التي يتم التحصل عليها على بعض العوامل مثل:

1. درجة الحرارة الابتدائية للتقسية.
2. حجم المنتج المراد تقسيته.
3. التركيب الكيميائي للصلب (العناصر السبائكية).
4. الخواص الحرارية لوسط التبريد.
5. درجة حرارة الوسط النهائية.

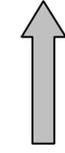
عندما تبرد سبيكة معدنية (سبيكة النحاس والقصدير مثلاً) فجائياً فإن ذلك يمنع حدوث تحولات في البنية الداخلية لذلك يصبح بالإمكان حبس البنية الداخلية كما هي عند درجة الحرارة العالية والإحتفاظ بها عند درجة حرارة الغرفة. إما في حالة سبائك الحديد والكربون فإن العكس هو الحادث حيث أنه لا يمكن الإحتفاظ بالأسنتنايت حتى درجة حرارة الغرفة عند التبريد المفاجئ من مجال الأسنتنايت وبدلاً من ذلك يتكون صنفاً أو أصنفاً أخرى هي وسط بين الأسنتنايت من جهة والبيرلايت من جهة أخرى تختلف في صلابتها لكنها جميعها أصلد من البيرلايت والأسنتنايت. يرجع ذلك لتمييز الحديد بظاهرة التحولات التآصلية (الألتروبية Allotropic أو التحول من FCC إلى BCC) كما تساعد سرعة انتشار ذرات الكربون داخل الشبكة البلورية لصغر حجمها بالنسبة لذرات الحديد في ذلك. التبريد المفاجئ لا يكون كافياً لمنع تحول البنية البلورية FCC للأسنتنايت إلى BCC ولكن نتيجة له تظل ذرات الكربون ذائبة بالتغلغل مما يؤدي إلى تشويه الشبكة البلورية المكعبة الجسم BCC مكونة ما يعرف بالمارتنسايت Martensite. ويؤدي وجود التشوه في المارتنسايت إلى منع تحرك الإنخلاعات Dislocations للذرات وبالتالي يقل أو ينعقد الإنزلاق لذلك يتميز المارتنسايت بالصلادة العالية والهشاشة **Extremely hard and brittle phase**. ويظهر المارتنسايت تحت المجهر في شكل حبيبات مستطيلة وإبرية الشكل.

يؤدي التبريد الأقل سرعة نسبياً إلى تكوين بنية تعرف بالبيننايت Bainite. وهي شبيهة إلى حد ما بالبيرلايت ويختلف نمو البيننايت عن البيرلايت في أن الفيررايت هو الذي تظهر نواته أولاً يتبعه الكريبيد (السمنتايت)، بينما في البيرلايت تظهر نواة الكريبيد أولاً.

نمو البيننايت يتم بسرعة وذلك لأن القوة الدافعة للنمو تزداد بإزدياد درجة عدم التوازن عند درجات الحرارة المنخفضة التي يتكون عندها. ويكون حجم الجزئي صغيراً جداً بحيث يصعب رؤيته بالمجهر ذو قوة التكبير البسيطة. معدلات التبريد الأبطأ تؤدي إلى تكون البيرلايت العادي وتعتمد خشونة وحجم شرائح السمنتايت والفيررايت على معدل التبريد (كلما كان المعدل أبطأ زاد حجم وخشونة الشرائح).

#### أوساط التقسية: Quenching medium

يتم إختيار وسط التبريد quenching medium حسب معدل التبريد اللازم للجزء المعين. والجدول التالي يوضح أوساط التبريد تبعاً لدرجة التبريد.



زيادة  
معدل  
التبريد

Caustic Soda	5% صودا كاوية
Brine	20.5 % محلول ملحي
Cold water	ماء بارد
Warm water	ماء دافئ
Material oil	زيت معدني
Animal oil	زيت حيواني
Vegetables oil	زيت نباتي

يستخدم التبريد السريع جدا **Very drastic quench** الناتج من استعمال محلول الصودا الكاوية فقط عندما يتطلب الأمر صلادة عالية جدا لأجزاء بسيطة الشكل.

**التقسية وحجم المنتج:**

حجم المنتج المراد تقسيته تحدد معدل التبريد الذي يجب إتباعه. فالمنتجات الضخمة تبرد بمعدل أبطأ من المنتجات الرقيقة عند تبريدها بسرعة، حتى أنه بينما يكون سطح المنتج مارتنسايتي يكون قلب المنتج السميكة بينائيتي لأنه يبرد بمعدل أبطأ من السطح.

**التقسية والتركيب الكيميائي للمنتج:**

إذا تم إضافة نسب بسيطة من بعض العناصر مثل النيكل أو الكروم أو المنجنيز للصلب يلاحظ أن طبقة المارتنسايت تصبح أكثر سمكاً منها في الصلب الكربوني العادي الذي يحتوي على نفس النسبة من الكربون والمبرد بنفس السرعة. لذلك فإن العناصر السبائكية **Alloy elements** تزيد من عمق التقسية وهذه خاصية هامة لأنها تجعل بالإمكان تقسية الصلب السبائكي بمعدل تبريد أبطأ نسبياً من المعدل اللازم للصلب العادي وبالتالي تقل قابلية الصلب لتكوين شروخ التقسية التي تنشأ من التبريد في الماء.

**التقسية وشكل المنتج:**

تصميم وشكل المنتج يؤثر على قابلية توليد شروخ التقسية **Cracking quench**. فالاختلافات الحادة في المقاطع ووجود حواف حادة ومجاري و حزات وثقوب مربعة تساعد في تكون شروخ التقسية في القطع الهندسية.

**شقوق التقسية: Cracking quench**

عند إجراء عملية التبريد يحدث نقصان في الحجم نتيجة للتقلص الذي يصاحب انخفاض درجة الحرارة، ويصاحب ذلك زيادة في الحجم بنسبة 3% نتيجة للتحويل من الأستنايت (FCC) إلى المارتنسايت (BCC مشوهة)، هذا يؤدي إلى حدوث إجهادات عالية داخل المعدن مما يؤدي إلى حدوث تشوه لدن كالأعوجاج أو أن تبقى الإجهادات التي تؤدي فيما بعد إلى تكوين شقوق وشروخ التقسية.

**المراجعة (تطويع الفولاذ): Tempering**

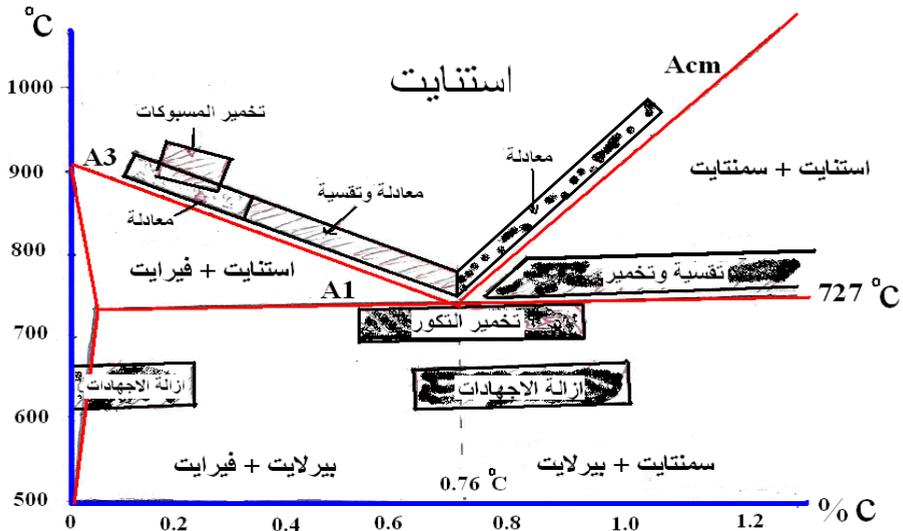
الصلب الكربوني المقسى كلياً يزيد حجمه ويكون هش (قصيفاً) وذو إجهادات داخلية عالية ولا يمكن استخدامه إلا بعد إجراء عملية المراجعة وذلك لإزالة الإجهادات الداخلية وتقليل القصفية في نفس الوقت. في عملية المراجعة يسخن

الصلب المقسى إلى درجة حرارة أقل من الدرجة الحرجة الدنيا A1 ويتم تثبيته عند تلك الدرجة لفترة زمنية مناسبة ثم يبرد بعد ذلك بالمعدل المطلوب لتحقيق البنية والخواص المطلوبة. تؤدي عملية المراجعة لما يعرف بتحول المارتنسايت. وكلما زادت درجة حرارة المراجعة كلما اقتربت البنية الداخلية من البنية البيرلايتية المستقرة. المراجعة عند درجات حرارة حتى 200°C تؤدي إلى إزالة الإجهادات فقط إلى حد ما. لكن المراجعة عند درجات من 230°C إلى 400°C تؤدي إلى تحول المارتنسايت إلى محلول صلب يسمى بالتروستايت وهو عبارة عن مخلوط دقيق كروي الشكل من الفيرايت و السمنتايت وهو أكثر متانة وطري نسبيا مقارنة بالمارتنسايت (أكثر ملائمة للاستخدامات التي يفضل فيها المتانة والمطاوعة عن الصلادة العالية).

المراجعة عند درجات حرارة أكثر من 400°C تؤدي إلى ترسيب جزئيات السمنتايت بدرجة تجعلها مرئية تحت المجهر بتكبير بسيط ويعرف هذا النوع من البنية بالسوربايت. والفرق بين التروستايت والسوربايت فقط في حجم الحبيبات.

#### تحول المارتنسايت:

عند تسخين الفولاذ المقسى يفرز المارتنسايت ذرات الكربون الزائدة فيه (المشوهة للبنية) فتتحد مع الحديد مكونة دقائق صغيرة من السمنتايت لا ترى بالمجهر البسيط مما يؤدي إلى نقصان الكربون في المارتنسايت مع ارتفاع درجة الحرارة. ذلك يؤدي إلى تقليل التشوهات في بنية المارتنسايت واقتراب بنيته من البنية المكعب المركزي الجسم البسيطة (الفيرايت).



الشكل (1) المعالجات الحرارية لأنواع الصلب الكربوني نسبة لمنحني التوازن الحراري

## الفصل الخامس

### المعالجات الحرارية للفلوآذ (الصلب الكربوني)

#### الجزء الثالث

#### التحولات عند درجات الحرارة الثابتة: Isothermal Transformations

البنية المجهرية ومن ثم خواص الصلب المعالج حراويا تعتمد بصورة أساسية على معدل التبريد المستخدم في المعالجة الحرارية. يمكن دراسة العلاقة بين معدل التبريد والبنية الداخلية لصلب معين (سبيكة محددة) بواسطة عدة منحنيات تحول عند درجات حرارة ثابتة وهي التي تعرف بال TTT-curves (منحنيات الزمن ودرجة الحرارة والتحول) (Time-Temperature-Transformation Curves).

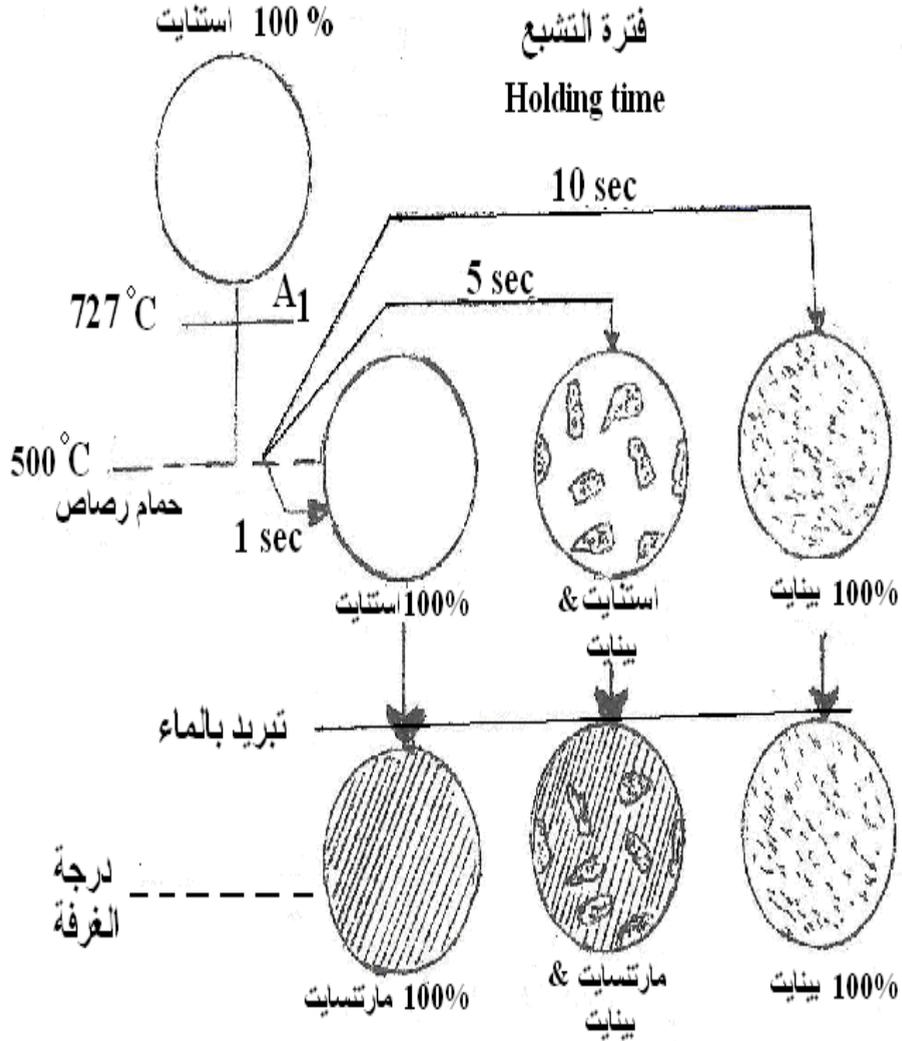
يبين الشكل (2) منحنيات TTT لصلب ايوتكتويدي (0.76 % كربون). وهي توضح الزمن اللازم للتحول الذي يحدث للبنية الداخلية عند تبريد الأستنايت تبريدا مفردا **super-cooling** وحفظه عند إي درجة حرارة ثابتة.

يتم إنشاء مثل هذه المنحنيات بأخذ عدة عينات من سبيكة الصلب تحت الدراسة وتسخينها لمجال الأستنايت ثم تبريدها فجائيا في حمامات ذات درجات حرارة مختلفة، وعند فترات زمنية محددة تسحب العينات من حماماتها وتبرد فجائيا في الماء ثم تفحص البنية المجهرية لمعرفة المدى الذي وصلت إليه عملية التحول عند درجة حرارة الحفظ.

على سبيل المثال إذا تم أخذ ثلاث عينات من الصلب الأيوتكتويدي وسخنت لدرجة حرارة أعلى مباشرة من  $727^{\circ}\text{C}$  (مجال الأستنايت)، ومن ثم تم تبريد العينات الثلاث فجائيا في رصاص مصهور عند درجة حرارة ثابتة  $500^{\circ}\text{C}$  (الشكل 1). إذا تم سحب عينة من الحمام بعد ثانية من الزمن ثم بردت فجائيا في الماء فسيتم الحصول على بنية كاملة من المارتنسايت، مما يعني أن الصلب عند درجة الحفظ وبعد ثانية واحدة لا تزال بنيته أستنايت ويتكون المارتنسايت نتيجة للتبريد المفاجئ في الماء (النقطة A في الشكل 2).

إذا تم أخذ إحدى العينات من الرصاص المنصهر بعد مرور عشرة ثواني (النقطة B في الشكل 2) ثم بردت فجائيا في الماء فإن البنية الناتجة تكون كلية من البيننايت مما يعني أن عشرة ثواني كافية لإكمال التحول إلى بيننايت. أما إذا أخذت عينة من المصهور بعد خمس ثواني (النقطة C في الشكل 2) ثم بردت فجائيا في الماء فستكون البنية خليط من البيننايت والمارتنسايت وذلك يدل على أن البنية الداخلية عند

درجة حرارة الحفظ (500°C) كانت محتوية على البينايث والأستنايث نتيجة لعدم إكتمال تحول الأخير.  
بتكرار مثل هذه المعالجات عند درجات حفظ مختلفة يمكن معرفة البينايث المجهرية الناتجة ومن ثم إنشاء منحنيات ال TTT.



الشكل (1) البنية المجهرية المتكونة أثناء التحول لمنحنى ال TTT-carve



الخطين المشكلين تقريبا لحرف C يمثلان الزمن اللازم لتفكيك الأستنايت إلى الفيرايث و السمنتايث للبداية والنهية تبعاً للتبريد المفاجئ لأي درجة حرارة معينة. تتعرق عملية التحول عند درجات الحرارة التي تقل مباشرة من الدرجة الحرجة السفلى نسبة لميل الأستنايت للاستقرار وعدم التحول، لكن فترة الحضانة وزمن التحول يقلان بإنخفاض درجة الحرارة حتى  $550^{\circ}\text{C}$ ، وفي هذا المجال نجد أنه كلما زاد مقدار معدل التبريد كلما زادت رغبة الأستنايت في التحول ويصل معدل التحول أقصاه عند  $550^{\circ}\text{C}$ .

عند درجات الحرارة التي تقل مباشرة عن  $727^{\circ}\text{C}$  حيث يتم التحول ببطء نجد أن البنية المتكونة عبارة عن بيرلايت خشن وذلك لوجود فترة كافية لحدوث الإنتشار، وفي مجال درجات الحرارة التي تعلق  $550^{\circ}\text{C}$  مباشرة نجد أن التحول السريع يؤدي إلى تكون بيرلايت دقيق جداً.

عند درجات الحرارة بين  $550^{\circ}\text{C}$  -  $220^{\circ}\text{C}$  نجد إن التحول يتعرق بإنخفاض درجة الحرارة وذلك لأنه بالرغم من زيادة عدم الاستقرار للأستنايت فإن البطء في معدل الإنتشار **Diffusion rate** لذرات الكربون في الأستنايت عند درجات الحرارة المنخفضة يفوق الرغبة المتزايدة للأستنايت في التفكك، وتكون نتيجة التحول في هذا المجال من درجات الحرارة هو البينايث الذي يختلف في المظهر بين الخشن ذو الشكل الريشي عند درجات الحرارة  $450^{\circ}\text{C}$  والناعم ذو الشكل الإبري عند درجات حوالي  $250^{\circ}\text{C}$ .

الخطوط الأفقية المتقطعة أسفل المنحنى تمثل درجات الحرارة التي يبدأ عندها تكون المارتنسايت ( $M_s$ ) وينتهي ( $M_f$ ) أثناء تبريد الأستنايت. ومن الملاحظ أن الخط  $M_f$  يقع عند درجة الحرارة  $50^{\circ}\text{C}$ - تقريباً، عليه فإذا برد الصلب فجائياً في الماء حتى درجة حرارة الغرفة فمن المتوقع وجود بعض الأستنايت المتبقي في البنية الداخلية لكنه يمثل أقل من 5%.

### منحنيات التحول TTT-curves والتبريد المستمر:

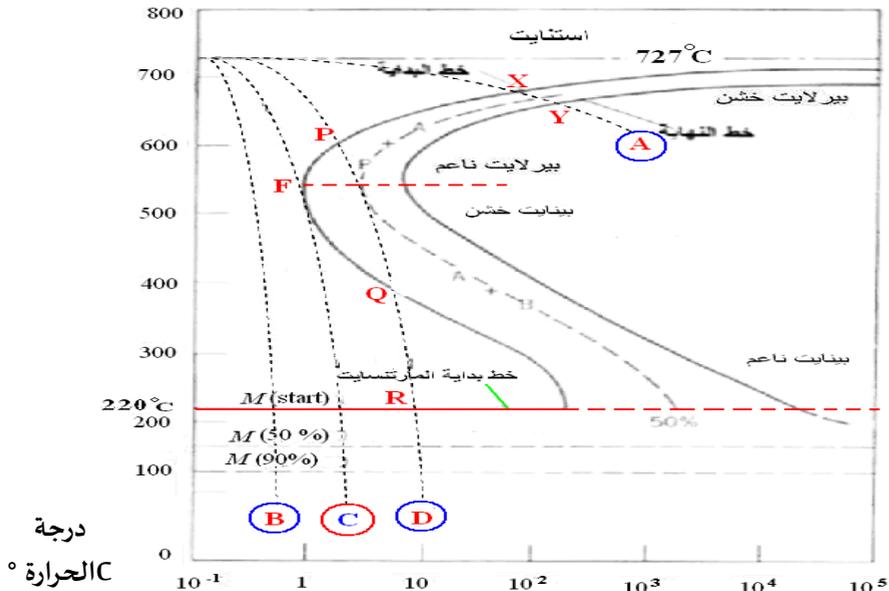
تبين منحنيات التحول TTT-curves البنيات المجهرية الناتجة من التحولات التي تتم عند درجات حرارة ثابتة وتحدد فيها فترة الحضانة (التشيع) التي لا بد من انقضاءها قبل بداية التحول. لكن يمكن الحصول على منحنيات التحول المعدلة التي تتم تحت ظروف التبريد المستمر بمعدل ثابت من أعلى من  $727^{\circ}\text{C}$  (مجال الأستنايت) وحتى درجة حرارة الغرفة، وهي تشبه في شكلها منحنيات التحول TTT-curves الحقيقية لكنها تنحرف جهة اليمين كما في الشكل (3).

في الشكل (33) توجد أربعة منحنيات A,B,C,D تمثل معدلات تبريد مختلفة. المنحنى A يمثل معدل تبريد حوالي 5 درجة مئوية في الثانية وهو ما يمكن تحقيقه بعملية المعادلة (تبريد في الهواء)، وفيه يبدأ التحول عند النقطة X وينتهي عند النقطة Y، وتكون البنية الناتجة عبارة عن بيرلايت ناعم.

المنحنى B يمثل معدل تبريد سريع جدا حوالي 400°C في الثانية وهو ما يشبه التبريد المفاجئ في الماء، ولا يبدأ التحول حتى تهبط درجة الحرارة إلى 220°C وعندها يبدأ تكون المارتنسايت. عند درجة حرارة الغرفة تكون البنية الداخلية عبارة من مارتنسايت وقليل جدا من الأستنايت المتبقي.

المنحنى C يمثل أبطأ معدل تبريد يمكن معه تقسية الصلب الأيوتكتويدي للحصول على بنية المارتنسايت كلية، ويسمى **معدل التبريد الحرج Critical cooling rate**

وهو حوالي 140°C في الثانية ويلامس خط بداية التحول عند النقطة F. المنحنى D يمثل معدل تبريد حوالي 50°C/s، وعنده التحول يبدأ عند النقطة P بتكوين بعض البيرلايت الدقيق وينتهي عند النقطة Q، وعند النقطة R يبدأ الأستنايت المتبقي في التحول إلى مارتنسايت وتكون البنية الداخلية عند درجة حرارة الغرفة خليط من المارتنسايت والبيرلايت وبقياء الأستنايت المتبقي.



الزمن بالثانية (مقياس لوغاريتمي)

الشكل (3) العلاقة بين منحنى التحول في درجات الحرارة الثابتة (TTT-carve) والتبريد

### تأثير الكربون والعناصر السبائكية على منحني التحول TTT-curve:

بصورة عامة للحصول على بنية داخلية مارتنسائيتية كاملة فإن الصلب يجب تبريده بمعدل لا يقطع أنف منحني التحول Nose of TTT-curve بحيث يكون معدل التبريد أكبر من أو يساوي معدل التبريد الحرج.

منحنيات التحول TTT-curves المستخدمة في الأشكال المرفقة كمثال هي لسبيكة فولاذ معينة وهي الصلب الأيوتكتويدي (نسبة الكربون 0.76%). إذا كانت نسبة الكربون في الصلب سواء أعلى أو أقل فإن المنحنيات سوف تنحرف إلى جهة اليسار بحيث يصبح معدل التبريد الحرج اللازم للحصول على بنية داخلية مارتنسائيتية كاملة كبيراً.

إضافة بعض العناصر السبائكية يؤدي إلى إبطاء معدلات التحول بحيث أن منحنيات TTT-curves تنحرف جهة اليمين. ذلك يعني أنه بالإمكان استخدام معدلات تبريد أبطأ في أوساط مثل الزيت أو حتى الهواء وذلك للحصول على البنية المارتنسائيتية. هذه العناصر مثل النيكل والكروم والمنجنيز.

### التطبيقات العملية الناتجة من دراسة منحنيات التحول عند درجات الحرارة

#### الثابتة:

بعد إنشاء منحني التحول عند درجات الحرارة الثابتة لسبيكة معلومة يمكن استخدامه في مجموعة من المعالجات الحرارية منها:

1. مراجعة المارتنسائيت. **Martempering**
2. مراجعة الأستنايت. **Austempering**
3. التخمير عند درجة الحرارة الثابتة. **Isothermal annealing**

#### مراجعة المارتنسائيت: **Martempering**

عند تبريد كتلة كبيرة من الصلب فجائياً بغرض التقسية فإن القلب يبرد أبطأ من السطح الخارجي ويقطع معدل تبريده B (الشكل 9.4-a) أنف خط بداية التحول لذلك من المتوقع وجود البيرلايت الدقيق في القلب بينما يتكون السطح كلية من المارتنسائيت. وتعرف هذه الخاصية بتأثير الكتلة على المعالجات الحرارية.

حتى لو تم تبريد المنتج بسرعة تكفي للحصول على بنية مارتنسائيتية كاملة فإنه سيكون هنالك فرق زمني CD بين كل من القلب والسطح (الشكل 9.4-b) مما يؤدي إلى تكون شقوق التقسية **Quench cracks** التي تنشأ من الإجهادات الناتجة من التغير الحجمي الغير متجانس الذي يحدث أثناء التقسية.

تحل هذه المشكلة بعملية المراجعة المارتنسايتية (الشكل c-9.4) وذلك بتسخين القطعة إلى درجة حرارة أعلى من A1 للحصول على الأستنايت ثم تبريدها فجائياً في حمام من محلول ملحي ذو درجة حرارة (E) تحت ركببة منحني TTT-carve وفوق درجة حرارة بداية التحول للمارتنسايت، ويترك المنتج عند هذه الدرجة لفترة كافية حتى يحدث التجانس الحراري بين القلب والسطح، ثم يأخذ من الحمام ويترك ليبرد في الهواء حيث يبدأ تحول المارتنسايت عند النقطة F.

يجب مراعاة عدم ترك المنتج في الحمام عند درجة الحرارة الثابتة لفترة طويلة حتى لا يبدأ التحول إلى بينايت. التبريد النهائي في الهواء لا يكون سريعاً بدرجة تؤدي لوجود إختلاف في درجات الحرارة ويصبح القلب والسطح مارتنسايت في آن واحد مما يقلل من القابلية إلى تكون شروخ التقسية.

#### مراجعة الأستنايت: Austempering

المراجعة الأستنايتية كما مبينة بالشكل (d-9.4) فيها يبرد الصلب فجائياً في حمام درجة حرارته أعلى من درجة حرارة التحول إلى المارتنسايت Ms ويحفظ عندها فترة طويلة تكفي لتحول البنية كلية إلى البينايت عند G، ثم يؤخذ ويبرد إلى درجة حرارة الغرفة في الهواء أو الماء حسب المعدل المطلوب.

الفولاذ الناتج من هذه العملية ذو بنية مشابهة في خواصها للتروستايت الذي يتم الحصول عليه بالتقسية والمراجعة معاً، كما يتم فيها تفادي التبريد المفاجئ في الماء لذلك فإن إجراء هذه العملية يقلل من التكلفة حيث تتم المعالجة الحرارية مرة واحدة كما تقلل من حدوث التشوه والاعوجاج والشروخ الناتجة من الإجهادات الداخلية المصاحبة للطرق التقليدية في التقسية ثم المراجعة. لذلك فإن مراجعة الأستنايت تستخدم في معالجة المنتجات المعقدة الشكل.

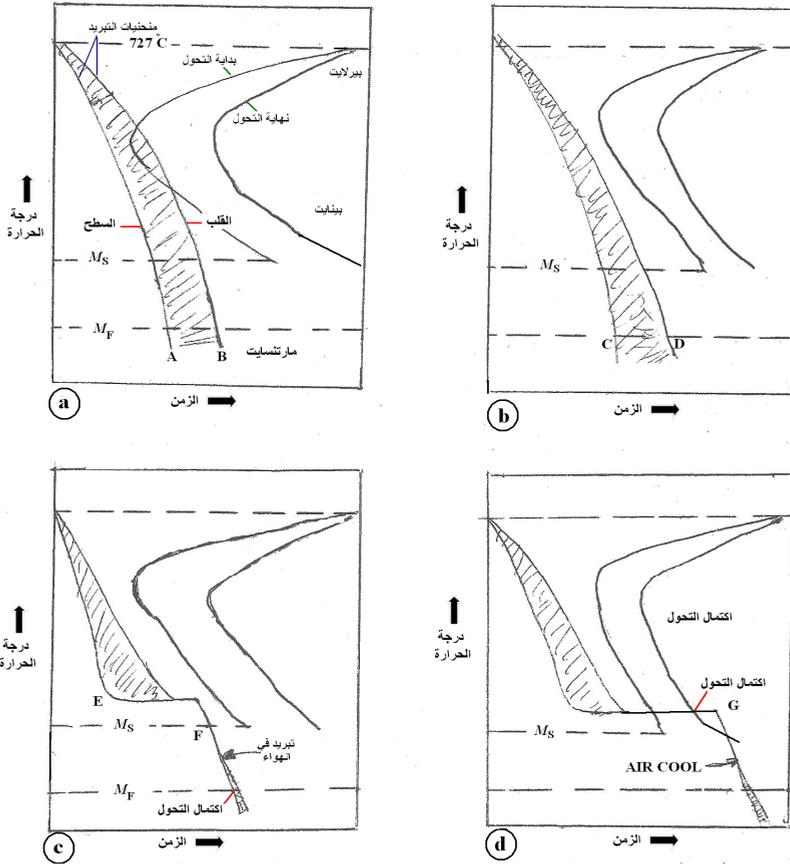
#### التخمير عند درجة الحرارة الثابتة: Isothermal annealing

التخمير عند درجة الحرارة الثابتة يعطي خواص متجانسة عن عملية التخمير العادية. وفي هذه العملية يتم تسخين المنتج لدرجة حرارة داخل مجال الأستنايت ثم يسمح له بالتحول الكامل إلى بيرلايت. والغرض من هذه العملية بوجه عام هو تليين الصلب بدرجة تكفي لعملية التشكيل على البارد أو لعمليات التشغيل الميكانيكي (القطع).

تتأثر طبيعة البيرلايت المتكون بدرجة الحرارة الابتدائية للأستنايت، فالتسخين لدرجة حرارة أعلى قليلاً من الدرجة الحرجة العليا A1 تسمح للصلب بتكوين سمنايت بيرلايتي كروي وذلك أثناء التخمير عند درجة الحرارة الثابتة. بينما التسخين لدرجات حرارة أعلى من ذلك يؤدي إلى تكون سمنايت بيرلايتي شرائحي.

أيضاً تتأثر البنية بدرجة حرارة التخمير (درجة الحفظ الثابتة)، فالتحول عند درجة حرارة أقل مباشرة من الدرجة الحرجة السفلى يؤدي إلى تكون سمنتايت بيرلايتي كروي وذلك لأن عملية الترسيب بطيئة بينما يؤدي التحول عند درجات حرارة أقل من ذلك إلى تكوين سمنتايت بيرلايتي شرائحي.

يفضل الكريبد (السمنتايت) الكروي عموماً لعمليات التشكيل على البارد والخرابة بينما يستخدم الكريبد الشرائحي في أغلب الأحوال في عمليات التفريز والثقب.



### مراجعة الأستنايت Austempering مراجعة المارتنسايت Martempering

الشكل (4) تأثير كتلة المعدن أثناء عملية التقسية الاعتيادية (a, b) وكيفية التغلب على هذا التأثير بمراجعة المارتنسايت (c) ومراجعة الأستنايت (d)

## الفصل السادس التصليد السطحي للفولاذ (الصلب الكربوني)

### The Surface Hardening of Steel

#### مقدمة:

تتطلب ظروف استخدام بعض الأجزاء المصنعة من الصلب مثل الكامات Cams والتروس Gears وجود أسطح صلبة ومقاومة للبري بالاحتكاك، وفي نفس الوقت يجب إن تكون قلوبها متينة ومقاومة للصدمات. في حالة الصلب الكربوني العادي تتوفر هاتان المجموعتان من الخواص في سبائك مختلفة في نسب الكربون، فالصلب منخفض الكربون الذي يحتوي على حوالي 0.1% كربون (فيراييت و بيرلايت) مرنا ومقاوما للصدم، بينما يتميز الصلب العالي الكربون المحتوي على 0.9% كربون فأكثر (سمنتايت و بيرلايت) بالصلادة الكافية بعد إجراء المعالجات الحرارية المناسبة عليه.

يقصد بالتصليد السطحي إجراء أو تطبيق عملية تؤدي إلى زيادة صلادة سطح المنتج من الفولاذ عن صلادة باقي جسم المنتج، وهذا يتم إذا كانت نسبة الكربون في السطح تختلف عن نسبته داخل المنتج، ويمكن الوصول لهذا الوضع بوحدة من طريقتين:

1. استخدام صلب منخفض الكربون ذو خواص مناسبة في القلب ثم توفير الظروف الملائمة لإدخال الكربون أو النتروجين إلى عمق محدد في سطح المنتج كما في عمليتي الكربنة Carburizing والنتردة Nitriding وتسمى هذه الطريقة بالتغليف السطحي.
2. استخدام صلب متوسط الكربون تمت عليه عملية التخمير أو المعادلة ثم تصليد سطحه موضعيا باللهب أو التيارات الحثية أو أي طريقة أخرى.

#### فوائد التصليد السطحي:

- ❖ إمكانية استخدام فولاذ رخيص الثمن بدلا من فولاذ غالي الثمن.
- ❖ يمكن تصليد أجزاء معينة من القطعة الواحدة أو تصليد جزء من السطح.
- ❖ تقليل مخاطر التبريد المفرط من تشوهات وإعوجاجات وإجهادات داخلية.

#### التغليف السطحي: Case hardening

أسس التغليف السطحي تعتمد على حقيقة أن الكربون أو النتروجين يتغلغلان بالانتشار داخل الحديد المسخن لمجال الأستنايت والذي يوجد عند درجات حرارة

أعلى من 910°C. لذلك فإن التغليف السطحي يتألف من إحاطة المنتج بمادة غنية بالكربون أو النتروجين وتسخينه لأعلى من الدرجة الحرجة العليا لفترة زمنية مناسبة تكفي للحصول على طبقة غنية بالكربون أو النتروجين للعمق الكافي. وبصورة عامة يمكن تقسيم عمليات التغليف السطحي إلى:

1. الكربنة السطحية. **Carburising**

2. النتردة السطحية. **Nitriding**

3. الكاربونتردة. **Carbonitriding**

**الكربنة السطحية: Carburising**

وهي العملية التي يتم فيها تشبيح سطح الفولاذ بالكربون دون داخل المعدن للحصول على التصليد المطلوب ومن ثم إجراء بعض المعالجات الحرارية بعد الكربنة. وتجرى عملية الكربنة في وسط صلب أو غازي أو سائل، وفي كل هذه الأحوال يتم تحرير الكربون الذري من الوسط الغني به لينتشر داخل سطح الفولاذ عند درجة حرارة وزمن كافيان لإنتشار الكربون للعمق المطلوب.

(أ) الكربنة في وسط صلب: **Carburising in solid media**

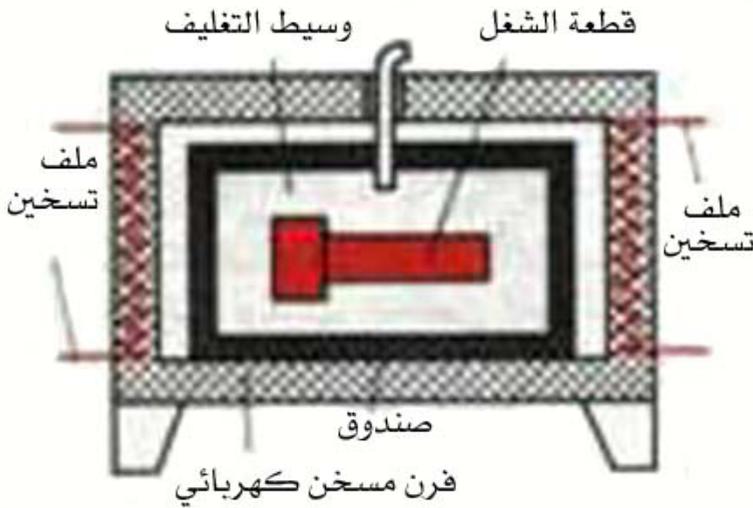
تسمى عادة بالكربنة بطريقة التعبئة **Packcarburising** حيث توضع الأجزاء المراد كربنتها في صناديق من الحديد الزهر أو صلب العدد مع المادة الكربونية على مسافات حوالي 50mm بين الأجزاء ثم تغطى الصناديق ويحكم غلقها بحشو أسمنتي مانع للتسرب (يمنع تسرب الكربون للخارج أو دخول الأكسجين من الجو)، وتسخن ببطء حتى درجة حرارة الكربنة بين 900°C - 950°C وتحفظ عند هذه الدرجة لمدة تصل إلى خمس ساعات حسب عمق التصليد المطلوب.

وسط الكربنة يتكون من 60% مادة كربونية مثل الفحم النباتي أو الفحم الحجري أو الفحم الحيواني (العظام والجلد المتفحم)، بالإضافة لحوالي 40% من مادة منشطة الغرض منها تسريع ذوبان لكربون وتغلغله في سطح المنتج وتكون عادة خليط من كربونات الصوديوم وكربونات الباريوم.

يعتقد أن عملية الكربنة تتم نتيجة لتفكك أول أكسيد الكربون الذي يوجد داخل الصندوق عندما يلامس سطح الصلب الساخن كما يلي:



إذا كان من الضروري منع مناطق من السطح من الكربنة فإن ذلك يتم بترسيب النحاس كهربائياً على تلك المناطق بسمك  $0.1 \text{ mm} - 0.075 \text{ mm}$  حيث لا يذوب الكربون في النحاس الصلب عند درجة حرارة الكربنة. كما توجد طريقة أخرى وهي تغطية المناطق المراد عدم كربنتها بخليط من الطين الحراري والأسبستوس المحروق المعجون بالماء وتركه يجف قبل الكربنة. بعد الانتهاء من الكربنة تبرد الأجزاء فجائياً أو تبرد داخل الصندوق حسب عملية المعالجة الحرارية التالية.



الشكل (1) الكربنة في وسط صلب

### (ب) الكربنة في وسط سائل: Carburising in a liquid bath

تتم الكربنة في وسط سائل في حمامات ملحية تحتوي على حوالي 50% من سيانيد الصوديوم NaCN مع نسبة تصل إلى 40% من كربونات الصوديوم وكميات مختلفة من كلوريد الصوديوم أو الباريوم، ويسخن هذا الخليط في بواتق مغلقة بالألمنيوم إلى درجة حرارة بين  $870^{\circ}\text{C} - 950^{\circ}\text{C}$  ومن ثم يفمر المنتج الموضوع داخل سلال من السلك لفترة تتراوح بين خمس دقائق حتى ساعة حسب عمق الطبقة المطلوبة. التفاعل المصاحب يكون كالاتي:



ثم بعد ذلك يتم تفكك أول أكسيد الكربون على السطح بنفس الطريقة التي تحدث في الكربنة في الوسط الصلب، كما يذوب النتروجين الذري أيضا في السطح مؤديا إلى زيادة الصلادة نتيجة لتكوين نتريدات كما يحدث في عملية النتردة.

من مزايا التصليد بالسيانيد:

1. دقة التحكم في درجة حرارة الحمام الملحي.
2. إمكانية تبريد السلة الحاوية للمنتج فجائيا عقب المعالجة بالسيانيد.
3. لا يؤدي فقط للحصول على الصلادة المطلوبة بل للحصول كذلك على سطح نظيف للمنتج.
4. العملية تتم بسرعة فائقة.

ومن عيوب التصليد بالسيانيد:

1. تعطي أعماق تقسية بسيطة (حوالي 0.1mm – 0.25) لذلك فهي مناسبة فقط لتصليد سطح الفولاذ الذي يحتاج للتصليد لعمق بسيط.
2. أملاح السيانيد سامة إلى حد كبير ويجب أخذ كل الإحتياطات لتفادي إستنشاق الأبخرة المتصاعدة كما يجب تذويد البوتقة بغطاء ساحب للأبخرة وعدم ملامسة الأملاح للجرح المفتوح وعدم تناول الأطعمة في الورش الحاوية على بواتق السيانيد.

### (ج) الكربنة في وسط غازي: Carburizing in a gaseous media

تجرى الكربنة في وسط غازي في أفران خاصة تسخن فيها المنتجات حتى حوالي 900°C لمدة ثلاث أو أربعة ساعات في جو يحتوي غازات هيدروكربونية ترسب ذرات الكربون على السطح كالميثان CH<sub>4</sub> والبروبان C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> وذلك مع غاز حامل لتسهيل دوران الغاز وإيجاد تجانس أفضل أثناء العملية.

الكربنة الغازية تصلح في حالة إنتاج الجملة وتحتاج إلى مكان قليل المساحة للإنتاج كما تتم بسرعة وتعطي سطحا أكثر نظافة يكون الكربون موزع فيه بانتظام للعمق المحدد بدقة أكثر ولكن متطلباتها من أفران خاصة وأجهزة تحكم تجعل تكلفتها عالية.

### النتردة السطحية: Nitriding

تشبه النتردة عملية الكربنة في أن الصلب يسخن لمدة معينة في وسط التغليف، لكن الوسط المستخدم في عملية النتردة هو النتروجين الغازي بالإضافة إلى أن النتردة تتم لأنواع خاصة من الصلب السبائكي ذلك لأن عملية التصليد فيها

تعتمد على تكوين نتريدات صلدة لبعض المعادن مثل الألمنيوم والكروم والفانديوم على سطح المنتج.

عملية الترددة تتم عند درجات حرارة منخفضة نسبياً لذلك تعتبر مرحلة نهائية في إنتاج المنتج على أساس أن جميع عمليات التشغيل الميكانيكي والمعالجات الحرارية للقلب تكون قد تمت قبل الترددة.

في الترددة السطحية تحفظ الأجزاء المراد نترديتها عند  $500^{\circ}\text{C}$  لمدة تتراوح بين 40 – 100 ساعة وذلك حسب عمق التقسية المطلوبة في غرفة أو فرن محكم يمر من خلاله غاز الأمونيا الذي يتفكك وفقاً للمعادلة:



وبذلك يمتص جزء من النروجين المتولد على السطح مكوناً نتريدات مع كل من الحديد والعناصر السبائكية السالفة الذكر.

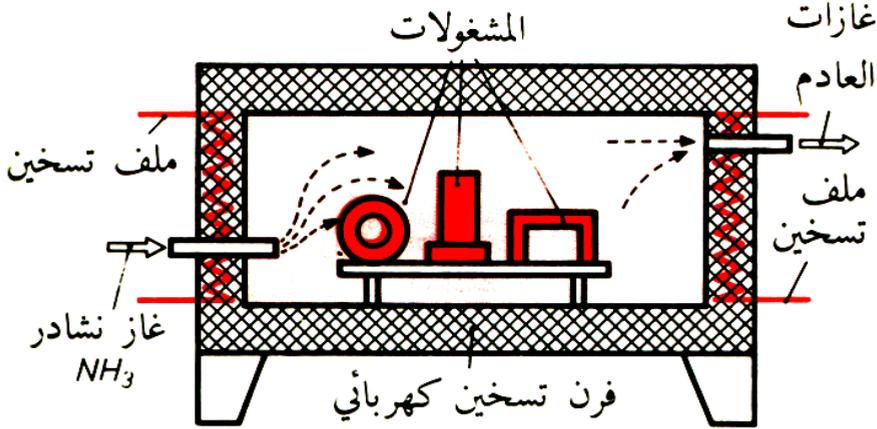
من مزايا عملية الترددة:

1. المنتج لا يحتاج إلى تبريد مفاجئ بعد الترددة لذلك يقل احتمال التشرخ أو تشوه المنتج. كما يمكن تشطيب المنتج قبل الترددة.
2. تعطي صلادة عالية للسطح تصل إلى 1150 فيكرز في سبيكة ال Nitralloy وهي سبيكة تحتوي على الألمنيوم.
3. يتميز السطح المنترد بمقاومة عالية للتآكل الكيميائي إذا ترك السطح دون تنعيم (صقل).
4. مقاومة الكلال (التعب) Fatigue جيدة.
5. السطح المنترد يحتفظ بصلادته عند تعرضه للحرارة حتى  $500^{\circ}\text{C}$  بينما السطح المكرن تنخفض صلادته عند حوالي  $200^{\circ}\text{C}$ .
6. تعتبر تكاليف العملية رخيصة إذا أجريت لعدد كبير من المنتجات.

عيوب عملية الترددة:

1. تكلفة معدات الترددة عالية مقارنة بالكربنة وتعتبر إقتصادية في حالة إنتاج أعداد كبيرة من المنتجات.
2. إذا تعرض المنتج المنترد لدرجة حرارة عالية فإن صلادة السطح تفقد كلية ويجب إعادة عملية الترددة مرة أخرى، بينما يحتاج المنتج المكرن فقط لإعادة تصليده مرة أخرى.

3. عمق السطح المنترد قليل ويحتاج لزمن طويل.  
 4. تفشل محاولات نتردة الصلب الكربوني العادي بسبب إنتشار نتريدات الحديد المتكونة إلى عمق داخل السطح مما يفقده الصلادة.



الشكل (2) التصليد بالنتردة

### الكاربونتردة: Carbonitriding

فمما يتم إشباع السطح بالكربون والنترجين معا عن طريق عملية الإنتشار وذلك للحصول على قشرة الكريد والنتريد ويتم ذلك إما في وسط غازي بإستخدام غاز جاف يتألف من خليط من غاز هيدروكربوني (مثل البروبان) وغاز مشبع بالنترجين (مثل الأمونيا) بالإضافة لغاز حامل. أو في وسط سائل بإستخدام حمام من الأملاح المنصهرة يحتوي على المادة المكرينة والمادة المنتردة (مثل سيانيد الصوديوم).

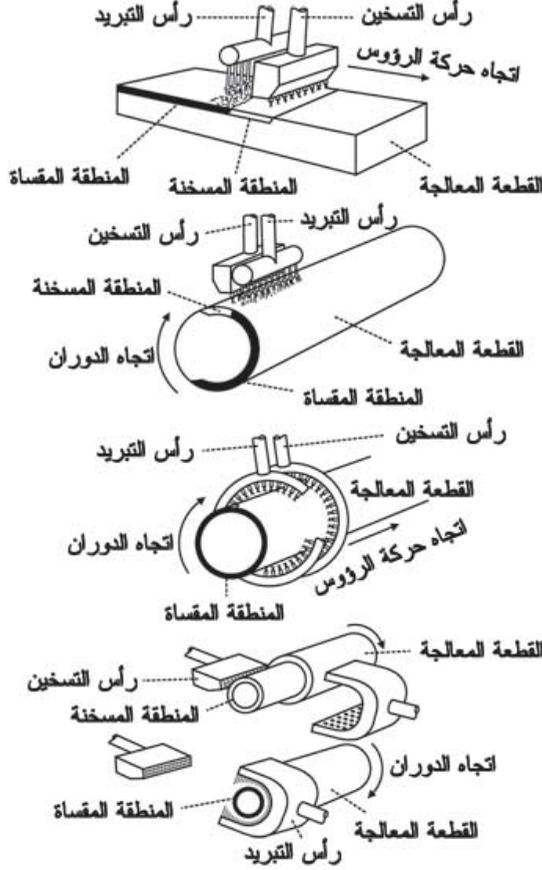
إضافة النترجين يزيد من سرعة إنتشار الكربون تحت درجة أقل من درجة الحرارة اللازمة لإنتشار الكربون أثناء الكرينة.

### التقسية السطحية باللهب: Flame hardening

في هذه العملية يكون التركيب الكيميائي للقلب هو نفس التركيب الكيميائي للسطح حيث يتم تصليد السطح بالمعالجة الحرارية موضعيا. وتستخدم لأنواع الصلب الكربوني المحتوية على أكثر من 0.4% كربون.

فمما يتم تسخين السطح لدرجة حرارة أعلى من الدرجة الحرجة العليا بواسطة مشعل متحرك للأكسي أستلين والتبريد الفجائي فورا بتيار ماء ملاصق للمشعل ويستعان بوسيلة ميكانيكية بغرض ضبط معدل التسخين والتبريد.

تصلح الطريقة لمعالجة الأجزاء المتماثلة مثل التروس والأعمدة وذلك لإمكانية دورانها بين مركزين. وقبل إجراء العملية لا بد من إجراء عملية معادلة حتى تكون البنية النهائية مكونة من القشرة المارتنساوية وقلب مرن من الفيرايت والبيرلايت وفي العادة يفصل بينهما طبقة من البينايت تمنع انفصال القشرة السطحية عن القلب.

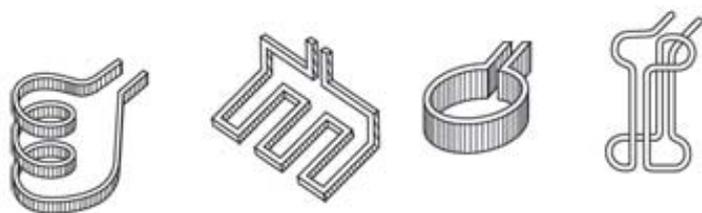
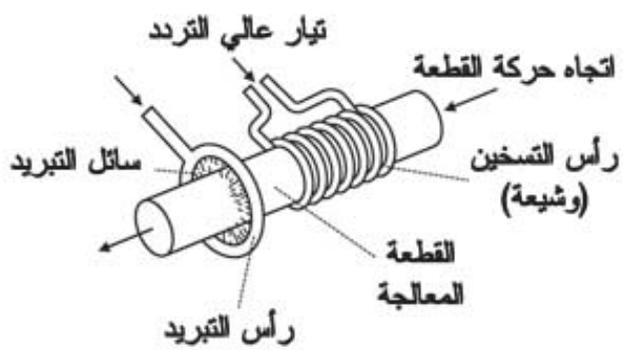


الشكل (3) التصليد بلهبه الأكسي أستلين

### التقسية السطحية بالتيارات التأثرية (الحث الكهربي): Induction

#### hardening

تشبه التقسية السطحية باللهب فيما عدا أن المنتج يحاط بملف يمر من خلاله تيار كهربي عالي التردد (حوالي 2000 ذبذبة في الثانية) مما يؤدي إلى رفع درجة حرارة السطح لأعلى من الدرجة الحرجة العليا خلال بضع ثواني ثم يبرد السطح فجائيا بتيار مائي مضغوط يمر من ثقب الملف.



الشكل (4) التقسية بالتيارات الحثية

# الفصل السابع

## الصلب السبائكي

### The Alloy Steel

#### مقدمة:

الصلب السبائكي عبارة عن سبائك من الحديد والكربون مضافة إليه بعض العناصر الأخرى لتحسين خواصه أو إدخال خواص جديدة. وهذه العناصر مثل المنجنيز **Manganese (Mn)** والنيكل **Nickel (Ni)** والكروم **Chromium (Cr)** والموليبدينوم **Molybdenum (Mo)** والتنجستين **Tungsten (W)** والسيلكون **(Si)** و**Silicon**. وهذه العناصر يمكن إضافتها مفردة أي كل عنصر لوحده أو في شكل مجموعة مكونة من عنصرين فأكثر. وإضافتها يؤدي إلى:

1. تذوب في البنية وتكون محاليل صلبة.
  2. تتفاعل مع الكربون وتكون كربيدات صلبة إلى جانب كربيد الحديد.
  3. تتفاعل مع الحديد وتكون مركبات وسيطة مثل  $Fe_3W_2$  و  $FeCr$ .
  4. تتفاعل مع بعضها البعض ومع الأكسجين وتكون أكاسيد.
- الأهداف الرئيسية من إضافة العناصر السبائكية إلى الصلب:
1. زيادة قابلية الفولاذ للتصليد.
  2. زيادة مقاومة التآكل (الصدأ)، فعناصر الكروم والنحاس والسيلكون تكون طبقة صلبة من الأكسيد على سطح الصلب.
  3. تحسين مقاومة البري بالإحتكاك.
  4. تزيد مقاومة الصلب للزحف **Creep**.
  5. تحسين خواص الصلب عند درجات الحرارة المرتفعة (الإحتفاظ بالخواص الميكانيكية كالصلادة).
  6. تحسين الخواص المغناطيسية للصلب.

#### أثر إضافة العناصر السبائكية للفولاذ:

يمكن تقسيم التأثيرات التي تحدثها العناصر السبائكية على البنية المجهرية ومن ثم خواص الصلب كالآتي:

#### (1) التأثير على درجة حرارة التحول:

#### The Effects on the Allotropic Transformation Temperature

يقصد بدرجات التحول هنا درجات التحول الألتروبية مثل درجة الحرارة  $912^{\circ}C$  حيث يتحول الحديد النقي بالتسخين من البناء البلوري المكعب المركزي

الجسم (BCC) (الحديد ألفا  $\alpha$ ) إلى البنية البلورية المكعب المركزي الأوجه (FCC) (الحديد قاما  $\gamma$ ). والدرجة  $1394^\circ\text{C}$  حيث يتحول الحديد قاما  $\gamma$  إلى البنية البلورية للمكعب المركزي الجسم مرة أخرى (الحديد دلتا  $\delta$ ).

التأثير في درجات التحول الألتروبية يؤثر بدوره في الخطوط الحرجة في منحى الإيزان الحراري. فبعض العناصر مثل النيكل و المنجنيز والكوبالت والنحاس تخفض الخط الحرج الأعلى A3 مما يؤدي إلى تثبيت الأستنايت وتوسيع من مدى درجات الحرارة التي يوجد بها الأستنايت في حالة مستقرة أي تؤخر تحول الأستنايت إلى فيرايت. وتتميز عناصر هذه المجموعة المثبتة للأستنايت بأنها ذات بنية مكعبة متمركزة الوجه (FCC) تماثل بنية الأستنايت.

بعض العناصر مثل الكروم والتنجستن والألمنيوم والسيلكون لها تأثير عكسي حيث تعمل على تثبيت الفيرايت عن طريق رفع الخط الحرج الأعلى A3 وتتميز عناصر هذه المجموعة المثبتة للفيرايت بأنها ذات بنية مكعبة متمركزة الجسم (BCC) تماثل بنية الفيرايت وتذوب فيه بسهولة أكثر. وعناصر هذه المجموعة تحدد المجال الذي يوجد فيه الأستنايت وتكون ما يسمى بحلقة الأستنايت المغلقة (loop)، والزيادة المستمرة في واحد أو أكثر منها تعمل على الوصول إلى نقطة تتلاشى عندها حلقة الأستنايت المغلقة وبذلك لا يوجد أستنايت عند أي درجة من درجات الحرارة. فمثلا إضافة 30% كروم للصلب الذي يحتوي 0.4% كربون يوقف نهائيا أي تحولات تآصلية في الحديد لذا لا يمكن معالجته حراويا.

## (2) التأثير على نمو الحبيبات: The Effect on Grain Growth

معدل نمو البلورات يزداد خاصة عند درجات الحرارة العالية بوجود بعض العناصر مثل الكروم. لذا يجب الحذر عند تسخين أنواع الصلب التي تحتوي على مثل هذه العناصر أو تركها مدة طويلة عند درجات الحرارة العالية. من جهة أخرى فإن معدل النمو يتأخر بوجود عناصر أخرى مثل النيكل والفانديوم حيث يقلل وجودها من حساسية الصلب لظروف التسخين أثناء المعالجات الحرارية.

## (3) التأثير على ثبات الكربيدات:

### The Effect on the Stability of the Carbides

بعض العناصر تكون كربيدات مستقرة Stable Carbide إلى جانب كربيد الحديد وتكون أصلد منه مما يساعد في إرتفاع الصلادة وهي مثل الكروم والتنجستن والفانديوم والموليبدنيوم والتيتانيوم والمنجنيز.

هنالك عناصر أخرى لها تأثير عكسي إذ تساعد على فصل الكربون ووجوده في صورة منفردة هي الجرافيت. وهي تشمل السيلكون والنيكل والألمنيوم. لذا تضاف هذه العناصر عندما تكون نسبة الكربون منخفضة جدا وتضاف عناصر المجموعة الأولى (مكونات الكرييدات) في حالة نسبة الكربون العالية.

#### (4) إزاحة نقطة الأيوكتويد: The Displacement of the Eutectoid Point

إضافة عنصر سبائكي إلى الصلب الكربوني يزيح عادة نقطة الأيوكتويد إلى اليسار في منحنى الإيزان. بمعنى آخر فإن الصلب يكون بيرلايتيا بالكامل حتى لو أحتوي على أقل من 0.76% كربون. فمثلا إضافة 2.5% من المنجنيز لصلب يحتوي على 0.65% كربون ينتج عنه بيرلايت بالكامل، وبالمثل فإن صلب السرعات العالية قد يحتوي على 0.7% كربون وفي نفس الوقت يكون غنيا بالكرييدات نتيجة لإزاحة نقطة الأيوكتويد لجهة اليسار.

كذلك تؤثر هذه العناصر في رفع وخفض درجة حرارة الأيوكتويد حيث تتحرك مع الخط A1.

#### (5) التحسين في خاصية المقاومة ضد التآكل:

##### The Improvement in Corrosion resistance

بعض العناصر مثل الألمنيوم والسيلكون والكروم تكون طبقة رقيقة من الأكاسيد المتناسكة تحمي الأسطح من التآكل. من جهة أخرى عندما تكون نسبة الكربون ضئيلة في الصلب فإن إضافة النيكل بكميات كافية يمكن من الحفاظ على التركيب الأستنايتي في درجة حرارة الغرفة وهذا له ميزة في تحسين المقاومة ضد التآكل عن طريق تقليل فرصة التآكل الألكتروليتي.

#### (6) التأثير على الخواص الميكانيكية:

##### Effects on the Mechanical Properties

من الأسباب الأساسية لإضافة العناصر السبائكية للصلب هو تحسين خواصه الميكانيكية. هذا التحسينات هي نتيجة للتغيرات الطبيعية التي سبق ذكرها. فمثلا تزيد الصلادة مع تثبيت الكرييدات وتزيد قوة الصلب عند ذوبان العناصر السبائكية في الفيررايت، وتزيد المتانة مع تهيذيب الحبيبات (تصغير حجمها).

#### أهم العناصر السبائكية:

##### (1) المنجنيز (Mn):

الصلب التجاري يحتوي على نسبة من المنجنيز تتراوح بين 0.3% إلى 0.8% وذلك لتقليل الأكاسيد ومعادلة كبريتيد الحديد الهش. إذا زادت نسبته عن ذلك فإنه

يكون كربيد المنجنيز  $Mn_3C$  بجانب السمنتايت والذي يؤدي كذلك إلى التقليل من درجة الحرارة عند A1 و A3 فيزيد من استقرار الأستنايت عند درجات الحرارة المنخفضة.

#### (2) النيكل (Ni):

سلوك النيكل مشابه لسلوك المنجنيز إذ يؤديان إلى إنخفاض درجة حرارة التحول الأيوتكتويدي للصلب. فمثلاً الصلب الذي يحتوي على 12% نيكل لا يحدث فيه تحول ايوتكتويدي إلا عند درجة حرارة أقل من  $300^{\circ}C$  أثناء التبريد. أما إذا وصلت نسبته 25% فأكثر فإن التركيب الأستنايتي يمكن الحفاظ عليه في درجة حرارة الغرفة بشرط أن تكون نسبة الكربون ضئيلة، هذا يؤدي إلى استقرار الأستنايت بالتالي زيادة مقاومة التآكل.

#### (3) الكروم (Cr):

يذوب الكروم في الفيررايت والأستنايت ليكون محاليل صلبة، وعند وجود الكربون يكون كربيد مثل  $(FeCr)_3C$  كما أن إضافته تؤدي إلى تحسين مقاومة الشد والصلادة والمقدرة على التصليد.

إذا كانت نسبته أكثر من 11% في الصلب منخفض الكربون فسيكون قشرة رقيقة عازلة في للسطح تزيد من مقاومة الصدأ والتآكل وهي طبقة من الأكسيد ذو اللون الفضي ويمتاز هذا النوع من الصلب باللمعان الشديد ويستخدم في الصناعات الكيميائية والأواني المنزلية والصناعات الغذائية، ومن أهم أنواعه الصلب الذي لا يصدأ **Stainless steel** الذي يحتوي على 13% كروم وأقل من 0.5% كربون.

#### (4) الموليبدنيوم (Mo):

يذوب في الفيررايت والأستنايت كما يكون كربيدات معقدة مثل  $Fe_2MO_2C$ . إضافته تحسن مقاومة الصلب للزحف كما تؤدي إلى الحفاظ على الخواص الميكانيكية عند درجات الحرارة العالية كما يؤدي كذلك إلى خفض القصف الناتجة عن المعالجات الحرارية.

#### (5) التنجستين (W):

يذوب في الفيررايت والأستنايت ويكون كربيدات مستقرة مع الكربون. كما يعمل على رفع درجات الحرارة الحرجة ويؤدي إلى إستقرار الكربون في كربيد الحديد وعدم تحلله في صورة جرافيت. يحسن الخواص المغناطيسية ومقاومة الصدأ عند درجات الحرارة العالية.

## (6) السيلكون (Si):

يذوب في الفيراييت ويزيد من صلابته وقابليته للتصليد. إذا زادت نسبته عن 0.4% يؤدي إلى إرتفاع المرونة والمتانة دون تقليل قابلية الصلب للسحب والطرق، أما إذا زاد عن ذلك فيؤدي إلى تفكيك كربيد الحديد ويجعل الصلب ضعيفا وهشا.

### تصنيف الصلب السبائكي: Classification of Alloy Steel

هنالك كثير من الطرق المعايير لتصنيف الصلب السبائكي وعموما يمكن تصنيفه إلى قسمين:

(أ) فولاذ منخفض السبائكية Low alloy steel

(ب) فولاذ عالي السبائكية High alloy steel

فولاذ منخفض السبائكية:

هو عبارة عن صلب له بنية تركيبية قريبة من الصلب العادي ويحتوي على حوالي 3% - 4% من عنصر سبائكي واحد أو أكثر وذلك بغرض زيادة المتانة والصلادة.

فولاذ عالي السبائكية:

وهو عبارة عن صلب عناصره السبائكية المضافة فيه غير الكربون أكثر من 5% ومن أمثلته:

### 1. الفولاذ المقاوم للصدأ: The stainless steel

وتعود مقاومة الصدأ فيه إلى وجود الكروم وهنالك ثلاث أنواع منه وهي الفولاذ المقاوم للصدأ الفيرايطي، الأستنايطي، والمارتنسايتي وهذه التسمية حسب البنية التركيبية الغالبة أو السائدة.

### 2. فولاذ السرعات العالية: High speed steel

وهو يستخدم في تصنيع عدد القطع التي تعمل بسرعات قطع عالية ومن أهم العناصر المضافة إليه هما عنصري التنجستن بنسبة تتراوح بين 13% - 18% والكروم بنسبة تتراوح بين 3% - 5%.

# الفصل الثامن

## الحديد الزهر

### The Cast Iron

#### مقدمة:

سبائك الحديد التي تحتوي على نسبة كربون تزيد عن 2% تعرف بالحديد الزهر وهذا هو الاختلاف الأساسي بين الصلب والحديد الزهر الذي يشبه إلى حد كبير في التركيب الكيميائي والبنية الداخلية تماسيح الحديد الخام Rod Pig iron المنتجة في الفرن العالي.

يستخدم الحديد الزهر بكثرة في الصناعة وذلك لخواصه المفيدة التي يمكن تلخيصها في الآتي:

1. رخيص الثمن حيث أنه لا يحتاج لعمليات تقنية عالية ومعقدة وباهظة الثمن.
2. سهولة تشغيله بالقطع Machining عندما يتم إختيار التركيب الكيميائي المناسب.
3. درجة إنصهاره منخفضة مقارنة بالصلب (بين 1130 °C - 1250 °C).
4. سيولته العالية وقابليته لإنتاج مسبوكات معقدة الشكل.
5. مقاومته العالية للبلل بالإحتكاك.
6. مقاومة عالية للإنضغاط وقدرة عالية لإمتصاص الإهتزازات.
7. بعض أنواعه تعطي متانة عالية ومقاومة شد بعد إختيار التركيب الكيميائي المناسب وإجراء معالجات حرارية.

#### أهم العوامل التي تؤثر على خواص وأنواع الحديد الزهر:

1. التركيب الكيميائي (محتويات السبيكة).
2. معدل التبريد.

#### تأثير التركيب الكيميائي على البنية الداخلية للحديد الزهر:

يعتبر الحديد الزهر سبيكة معقدة تحتوي على نسبة تصل إلى 10% من عناصر الكربون والسيلكون و المنجنيز والكبريت والفسفور ...إلخ، والبقية من عنصر الحديد. هذه العناصر السبائكية تؤثر تأثيرا كبيرا على خواص وبنية الحديد الزهر.

#### **الكربون: Carbon**

يوجد الكربون في الحديد الزهر في إحدى صورتين:

أ- في صورة كربون حر أو جرافيت وفي هذه الحالة يعرف بالكربون الجرافيتي.  
ب- يتحد مع الحديد ليكون كبريد الحديد (السمنتايت) وفي هذه الحالة يعرف بالكربون المتحد.

الكمية الكلية لكلا النوعين في عينة الحديد الزهر تعرف بالكربون الكلي. وتعتمد الصورة التي يوجد عليها الكربون في الزهر إلى حد كبير على تأثير السيلكون وبعض العناصر السبائكية الأخرى التي تؤثر على إستقرار السمنتايت.

السمنتايت (كبريد الحديد) من المركبات الصلدة ولونه أبيض وهش لذا فإن الحديد الذي يحتوي على نسبة عالية منه يظهر مقطعه أبيضاً عند الكسر وله مقاومة منخفضة للصدم وفي نفس الوقت يتميز بمقاومته العالية للبلل بالإحتكاك. وتسمى مثل هذه الأنواع من الحديد بالحديد الزهر الأبيض.

إذا كان مقطع الكسر في الحديد الزهر يحتوي على الجرافيت فإنه يظهر رمادي اللون ويسمى هذا النوع بالحديد الزهر الرمادي. وحجم وكمية قشور الجرافيت تؤثر إلى حد كبير في الخواص الميكانيكية للحديد الزهر الرمادي وهو يؤدي إلى تقليل الصلادة وتحسين خواص التشغيل بالقطع للحديد.

#### السيلكون: Silicon

وجود السيلكون في الحديد الزهر يؤثر تأثيراً مباشراً على الشكل الذي يتخذه الكربون في البنية، فهو يميل إلى تفكيك السمنتايت مكوناً الجرافيت وبذلك يكون الحديد الزهر رمادياً. وكلما زادت نسبة السيلكون كلما زادت درجة تفكك السمنتايت وزادت حجم قشور الجرافيت الناتجة مما يؤدي إلى التقليل من صلادة الحديد. وفي نفس الوقت من جهة أخرى فإن السيلكون يذوب في الفيررايت ويؤدي إلى تقويته وذلك عندما تزيد نسبته عن تلك الضرورية لإتمام تفكك كل السمنتايت مما يؤدي مرة أخرى إلى زيادة الصلادة والهشاشة لذلك لا بد من الأخذ في الإعتبار كلا التأثيرين المباشر وغير المباشر للسيلكون.

لوجود عنصر السيلكون في الحديد الزهر تأثيراً كبيراً حيث أنه يزيد من سيولة الحديد المنصهر مما يحسن من خواص الزهر المنتج عن طريق عملية السباكة ويساعد في إنتاج أشكال معقدة الشكل.

#### الكبريت: Sulfur

الكبريت في الحديد الزهر له تأثيراً عكسياً لتأثير السيلكون حيث أنه يميل إلى تثبيت السمنتايت مما يعرقل عملية الجرفته ويؤدي إلى إنتاج حديد زهر أبيض

صلد وهش. بالإضافة إلى ذلك فإنه يكون كبريتيد الحديد FeS الذي يزيد أيضاً من قابلية القصافة.

### المنجنيز: Manganese

يتم التحكم في تأثير الكبريت بواسطة نسبة المنجنيز الموجود في الحديد حيث أنه يتحد مع الكبريت مكوناً كبريتيد المنجنيز MnS الذي يختلف عن كبريتيد الحديد في أنه غير قابل للذوبان في المعدن المنصهر ويطفو على السطح مع الخبث Slag لذلك فإن التأثير المباشر للمنجنيز في الحديد الزهر هو إزالة تأثير الكبريت الضار. من ناحية أخرى فإنه يساعد على تثبيت الكربيدات وزيادة الصلادة وتقليل حجم الحبيبات وزيادة المتانة.

### الفسفور: Phosphorous

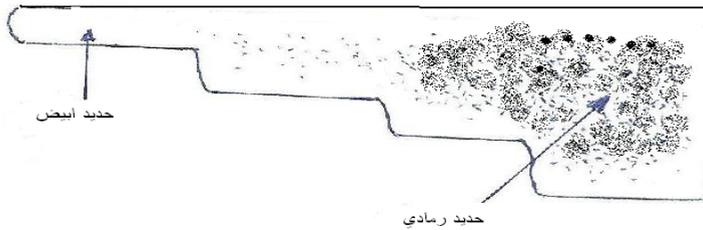
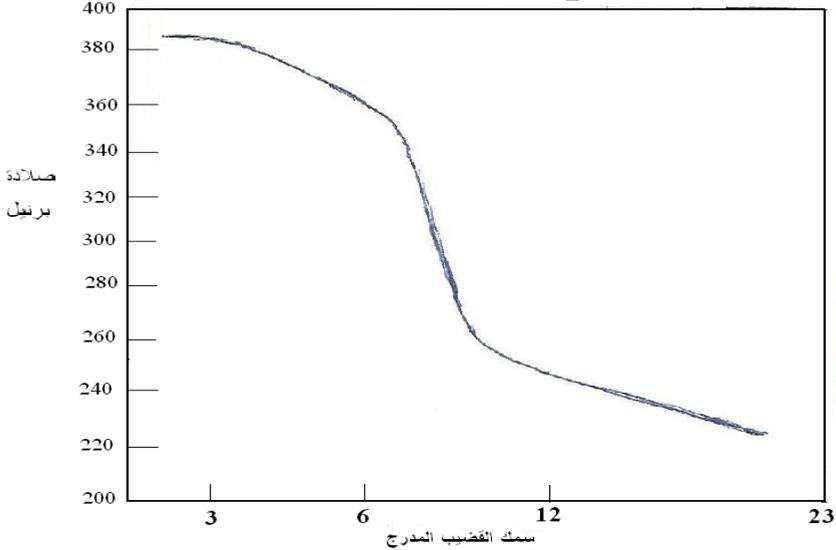
وجود الفسفور في الحديد الزهر ليس له تأثير على إستقرار السمنتايت لكنه يوجد في هيئة فوسفيد الحديد  $Fe_3P$  الذي يكون يوتكتيك مع الحديد في أنواع الحديد الزهر الرمادي ومع الفيررايت و السمنتايت في الحديد الزهر الأبيض. وتنصهر هذه المركبات الايوتكتيكية عند درجات حرارة أقل (حوالي  $950^{\circ}C$ ) مما يجعل أنواع الحديد الزهر عالية الفسفور تمتاز بالسيولة العالية ، لذلك فإن الحديد الزهر المحتوي على 1% فسفور يعتبر مناسب لإنتاج المسبوكات الرقيقة المقطع. في حالة المسبوكات ذات المقاطع السمكية لا بد من تقليل نسبة الفسفور إلى حوالي 0.3% لتجنب حدوث المسامات التقلصية نسبة لدرجة الإنصهار المنخفضة. وجود فوسفيد الحديد يزيد من الصلادة والهشاشة للحديد الزهر لذلك لا بد من تقليل نسبة الفوسفور في المسبوكات التي تتطلب مقاومة للصدمات.

### تأثير معدل التبريد على البنية الداخلية للحديد الزهر:

يؤدي التبريد السريع أثناء تجمد الحديد الزهر إلى منع تفكك السمنتايت الذي كان في حالة التبريد البطئ ليتفكك إلى الجرافيت. هذا التأثير يجب الإهتمام به عند إختيار الحديد المناسب لإنتاج مسبوكات رقيقة المقطع.

يظهر هذا التأثير عند صب قضيب مدرج من الحديد الزهر بالتركيب الكيميائي المناسب الشكل (1). في هذه الحالة فإن المقطع الصغير يبرد بسرعة كبيرة لا يمكن معها حدوث أي تفكك للسمنتايت كما يتضح من المقطع الأبيض لمكان الكسر والصلادة العالية. أما المقاطع الأكبر التي تبرد ببطء أكبر فإن السمنتايت يتفكك ويكون الجرافيت بالتالي تكون صلابتها أقل. كما يجب ملاحظة أن جدران قوالب

الصب تؤدي إلى زيادة معدلات التبريد في سطح المسبوكات لذلك تكون هذه المسبوكات مغلقة من الخارج بطبقة سطحية من الحديد الزهر الأبيض الصلب ويكون ذلك ظاهرا بوضوح عند بدء عمليات التشغيل بالقطع لهذه المسبوكات. مما سبق ذكره فإنه إذا تم إختيار نوع من الحديد الزهر لو برد ببطء إحتوت بنيته الداخلية على قشور صغيرة من الجرافيت لإنتاج مسبوكات رقيقة المقطع، فإن المقاطع الصغيرة تبرد بسرعة كبيرة تمنع تفكك السمنتايت وبذلك يكون المقطع الصغير مكونا كلية من الحديد الزهر الأبيض الهش وعديم الفائدة، لذلك وعند إنتاج مسبوكات رقيقة المقاطع يجب إختيار حديد زهر رمادي ذو قشور جرافيتية غليظة بدرجة أكبر من المطلوب في المنتج النهائي. هذا يعني أن الحديد يجب أن يحتوي على نسبة عالية من السيلكون تزيد عن نسبته في الحديد المستخدم في صب المسبوكات ذات المقاطع الكبيرة.



الشكل (1) تأثير سمك المقطع على معدل التبريد وبالتالي على البنية الداخلية للحديد الزهر الرمادي

## البنية الداخلية للحديد الزهر : The Microstructure of Cast Iron

البنيات الداخلية التي يمكن أن تصادفنا في أنواع الحديد الزهر ذات التركيب الكيميائي المختلف ومعدلات التبريد المختلفة تكون كما يلي:

(A) سمنتايت وبيرلايت فقط: تكون في أنواع الحديد الصلب الأبيض قليل السيلكون وعالي الكبريت كما توجد أيضا في أنواع الحديد المبرد فجائيا.

(B) سمنتايت أولي وجرافيت وبيرلايت: توجد في أنواع الحديد الزهر المرقش الذي فيه بعض من السمنتايت الأولي قد تفكك مكونات الجرافيت.

(C) جرافيت وبيرلايت: تعتبر نموذجية للحديد الزهر المناسب للخدمة الشاقة Heavy duty والذي يكون فيه كل السمنتايت قد تحول إلى جرافيت.

(D) جرافيت وبيرلايت وفيراييت: توجد في الحديد الرمادي ذو قشور الجرافيت الغليظة الذي يكون أضعف وأقل صلادة.

(E) جرافيت وفيراييت: في هذه الحالة يكون كل السمنتايت الأولي والسمنتايت البيرلايتي قد تفككا إلى جرافيت ويكون السبب عادة إرتفاع نسبة السيلكون ويكون هذا النوع من الحديد الزهر طري جدا وسهل التشغيل بالقطع.

بالإضافة للأصناف المذكورة أعلاه فإن البنية الداخلية للحديد الزهر قد تحتوي على مكونات أخرى لها تأثيرها مثل فوسفيد الحديد  $Fe_3P$  كما سبق الإشارة لذلك.

### أنواع واستخدامات الحديد الزهر:

تبعاً للخواص والإستخدام يمكن تصنيف الحديد الزهر إلى الآتي:

- (1) الحديد الزهر الرمادي.
- (2) الحديد الزهر الأبيض.
- (3) الحديد الزهر المطاوع أو المطيل (ذو الجرافيت الكروي).
- (4) الحديد الزهر الطروق.

### الحديد الزهر الرمادي: Gray Cast Iron

عبارة عن سبيكة من الحديد تحتوي على نسبة كربون بين 2% - 3%، والبنية الداخلية له عبارة عن شرائح من الجرافيت في أرضية من البيرلايت أو شرائح من الجرافيت زائدا البيرلايت في أرضية من الفيراييت تتأثر بنيته الداخلية بوجود عناصر أخرى مثل السيلكون. ويستخدم في تصنيع بيوت المضخات وهياكل الماكينات وبيوت السلندرات وغيرها.

## الحديد الزهر الأبيض: White Cast Iron

بنيته الداخلية عبارة عن سمنتايت في أرضية من البيرلايت ويمكن الحصول عليه بالتبريد السريع للمسبوكات ذات المقاطع الرقيقة إذ أن السمنتايت لا يجد الوقت الكافي للتفكك وهو محدود الإستعمال نسبة لصلادته العالية وصعوبة تشغيله. ويستخدم الحديد الزهر الأبيض في تصنيع الأشياء المعرضة للإحتكاك العالي مثل كسارات الحجارة وغيرها.

## الحديد الزهر المطاوع (الحديد ذو الجرافيت الكروي): Spherical-graphite (S.G)

يشبه الحديد الزهر الرمادي لكن فيه قشور الجرافيت تستبدل بجزيئات مستديرة وذلك نتيجة إضافة كميات بسيطة من بعض العناصر السبائكية مثل الماغنسيوم للحديد المنصهر قبل الصب مباشرة. هذا يعطي البنية الداخلية إستمرارية وتختفي مناطق تركيز الإجهادات مما يحسن من مقاومة الشد (قد تصل إلى حوالي  $770\text{N/mm}^2$ ).

## الحديد الزهر القابل للطرق (الطروق): Malleable Cast Iron

هي أنواع حديد تم صبها بالطريقة الإعتيادية إلا أن مطيليتها وقبليتها للطرق تزداد نتيجة للمعالجات الحرارية وهو نوعان حسب مقطع الكسر ولونه هما:  
أ. الحديد الزهر الطروق ذو القلب الأسود.  
ب. الحديد الزهر الطروق ذو القلب الأبيض.

## الحديد الزهر الطروق ذو القلب الأسود: Black heart Malleable Iron

ينتج من مسبوكات الحديد الأبيض ذات التركيب الكيميائي 2.5% كربون و1% سيلكون و0.4% منجنيز و0.08% كبريت و1% فسفور.

### المعالجة:

بعد السباكة توضع المسبوكات في أوعية من الحديد الأبيض مع مادة غير متفاعلة مثل الحصى أو رماد الفحم حيث تكون كحامل للمسبوك ، ثم تغطي الأوعية ويحكم الغطاء بحشو أسمنتي مانع للتسرب لعزل المسبوك عن الهواء وتوضع الأوعية في فرن درجة حرارته بين  $850^{\circ}\text{C} - 950^{\circ}\text{C}$  وتستمر المعالجة بين 50 - 170 ساعة حسب نوع وتركيب المسبوك.

أثناء عملية التخمير يتفكك السمنتايت ويتسبب الكربون وتكون البنية الداخلية من الفيررايت والكربون. وهذا النوع من الحديد الزهر سهل الصب ومقاوم للصدم وسهل القطع بالماكينات، ويستخدم في صناعة أجزاء السيارات مثل علبة المحور الخلفي وصرة العجل ولقم الفرامل والدواسات والروافع ومفاصل الأبواب.

**الحديد الزهر الطروق ذو القلب الأبيض: White heart Malleable Iron**  
ينتج المسبوك من الحديد الأبيض ذو التركيب الكيميائي 3.3% كربون، 0.6% سيلكون، 0.5% منجنيز، 0.25% كبريت، و0.1% فسفور.

#### المعالجة:

تسخن المسبوكات في وسط مؤكسد مثل خام الهيماتيت لفترة زمنية تتراوح بين 70 – 700 ساعة. خلال هذه الفترة الكربون الموجود في السطح يتأكسد مكوناً ثاني أكسيد الكربون، وهذا يؤدي إلى أن قلب المسبوك يفقد الكربون نتيجة لانتشاره للسطح.

عند إنتهاء المعالجة نجد أن المقاطع الرقيقة تكون ذات بنية فيرايتية وهذا النوع يستخدم في إنتاج أنابيب الغاز والماء والبخار وأجزاء الماكينات الزراعية وماكينات النسيج والتي تتطلب مطيليه عالية.

## **الباب الثالث**

### **المعادن الغير حديدية**



# الفصل الأول النحاس وسبائكه

## Copper and Copper Alloys

### مقدمة:

يعتبر النحاس من أقدم المعادن التي عرفها الإنسان، وعرف العصر الذي تلى العصر الحجري في الحقب التاريخية بالعصر البرونزي نسبة لسبيكة البرونز (النحاس والقصدير) التي استخدمها الإنسان في جميع ضروب حياته من أدوات القتال إلى الأواني والزينة.

يوجد النحاس في الطبيعة في شكل خامات معقدة أهمها الخامات الكبريتية مثل الجالكوبرايت Chalcopyrite ( $CuFeS_2$ ) الذي يحتوي على % 34.5 نحاس، والجالكوسايت Chalcosite ( $Cu_2S$ ) الذي يحتوي على % 79.8 نحاس. وتتم تنقية النحاس من خاماته بطريقتين:

1. الصهر وأكسدة الشوائب. Fire refining.

2. التحليل الكهربائي. Electrolyte refining.

الطريقة التي تستخدم لتنقية النحاس تحددها درجة النقاوة المطلوبة ومن ثم الإستخدام. ففي طريقة الصهر يتم صهر الخام في الأفران الخاصة بذلك وتتم عملية الأكسدة وإزالة الشوائب عن طريق الإضافات وإمرار الهواء. إما طريقة التحليل الكهربائي فتتم فيها التنقية باستخدام قضيب من النحاس النقي للقطب السالب ويمثل خام النحاس القطب الموجب ويتم توصيل القطبين في وجود محلول متأين حيث يتم انتقال ذرات النحاس النقي من القطب الموجب إلى القطب السالب وتتراكم عليه نتيجة لحركة الأيونات، بهذه الطريقة يمكن الحصول على نحاس ذو درجة عالية من النقاوة تصل إلى % 99.9.

### أهم الخواص المميزة للنحاس:

(1) درجة انصهار النحاس  $1083^{\circ}C$  وله بنية تركيبية مكعب مركزي الوجه F.C.C ويمتاز باللدانة العالية High ductility وصلادة منخفضة ومقاومة شد منخفضة، ويمكن تحسين خواصه الميكانيكية بإضافة العناصر السبائكية وبالتشكيل على البارد Cold working حيث ترتفع الصلادة من 40BH إلى 90BH ومقاومة الشد من  $220 \times 10^6 N/m^2$  إلى  $460 \times 10^6 N/m^2$ .

- (2) التوصيل الجيد للكهرباء، ويأتي النحاس الثاني بعد الفضة من حيث توصيل الكهرباء لذلك تستهلك نسبة كبيرة من الإنتاج العالمي للنحاس النقي بصورة رئيسية في الصناعات الكهربائية من أسلاك وملفات. ووجود الشوائب والعناصر الأخرى يقلل من الموصلية الكهربائية. كذلك التشكيل على البارد له نفس التأثير لكن بدرجة أقل.
- (3) التوصيل الجيد للحرارة لذلك يستخدم في صناعة أنابيب الغلايات والثلاجات ومسامير البرشام للقاطرات البخارية والصناعات الكيميائية والغذائية.
- (4) كثافته عالية  $8.93 \text{ Kg/m}^3$  تعادل ثلاث مرات كثافة الألمنيوم ومقاومته عالية للتآكل (البنية التركيبية متجانسة).

### أنواع النحاس التجارية: The Commercial Grade of Copper

(1) النحاس ذو الموصلية الكهربائية العالية ويطلق عليه أسم النحاس الخالي من الأكسجين ذو الموصلية العالية Oxygen Free High Conductivity Copper (O.F.H.C) وهو النحاس المستخلص بالتحليل الكهربائي ويكون على درجة عالية من النقاوة تصل إلى 99.9% . ويستخدم في الأغراض التي تتطلب موصلية كهربية وحرارية عاليتين.

(2) النحاس المستخلص من أفران الصهر وهو إما يكون:

أ. نحاس ذو عسو مرتفع. Tough pitch

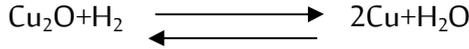
ب. نحاس مؤكسد. Deoxidized

وذلك تبعاً للاستخدام ونسبة الأكسجين فيه. النوع الأول يحتوي على نسبة بسيطة من الأكسجين الذي تم امتصاصه أثناء عملية الصهر والاستخلاص، موجود على هيئة أكسيد نحاسوز  $\text{Cu}_2\text{O}$  (0.04%-0.05% أكسجين). ويوجد أكسيد النحاسوز على هيئة كريات دقيقة وهي جزء من الأيونات المتكثفة المكون من أكسيد النحاسوز والنحاس.

لتلك الكريات تأثير طفيف على الموصلية الحرارية والكهربية يمكن تجاهله، كما أن وجودها يعتبر مفيد لأن الشوائب الضارة مثل البيزموت تتجمع على هيئة أكاسيد مع كريات أكسيد النحاسوز بدلاً من التواجد على هيئة طبقة هشّة على الحدود الحبيبية.

أما بالنسبة للعمليات الإنتاجية مثل اللحام وسحب الأنابيب فإن وجود تلك الكريات يسبب ضرراً كبيراً لأن وجودها في الأجواء المختزلة المحتوية على الهيدروجين

يؤدي إلى حدوث البخبة في المعدن Gassing. فالهيدروجين قابل للذوبان في النحاس الصلب وعند تلامسه مع كريات أكسيد النحاسوز يؤدي إلى اختزالها مكونا الماء على هيئة بخار غير قابل للذوبان في النحاس لذلك يتجمع في فقاعات مسببا البخبة.



لذلك فإن النحاس المستخدم في أغراض اللحام يتم إختزاله من الصب بإضافة الفسفور الذي يذوب في النحاس بعد الإختزال.

### سبائك النحاس:

يكون النحاس مع العناصر الأخرى سبائك من أهمها:

1. سبيكة النحاس الأصفر. Brass
2. سبائك البرونز القصديري. Bronze
3. سبائك البرونز الألمونيومي. Aluminum Bronze
4. سبائك النحاس والنيكل. Nickel Copper

#### 1. سبائك النحاس الأصفر: Brass

وهي عبارة عن سبائك تتكون من النحاس والزنك وقد تصل نسبة الزنك إلى 45%. الشكل (13.1) يمثل مخطط الإتزان لهذه السبائك.

يذوب الزنك في النحاس بنسبة % 32.5 عند درجة حرارة 902°C (خط الصلابة) وتزداد هذه النسبة بانخفاض درجة الحرارة لتصل % 39 عند درجة الحرارة 454°C، ثم تعود مرة أخرى للانخفاض حتى تصل % 35.2 عند درجة 250°C ويرمز للمحلول الصلب بالرمز ألفا (α). والطور ألفا طري ومطيل عند درجة حرارة الغرفة.

إذا زادت نسبة الزنك عن % 39 فإن الطور بيتا (β) يظهر في البنية الداخلية للنحاس الأصفر المبرد ببطء. ويمتاز هذا الطور بصلادة عالية وقابلية للتشكيل على البارد أقل من ألفا.

أما إذا زادت نسبة الزنك عن % 50 فإن الطور قاما (γ) يظهر في البنية الداخلية ويمتاز بأنه هش. وبصورة عامة يمكن تصنيف سبائك النحاس الأصفر إلى سبائك يمكن تشكيلها على البارد وأخرى يمكن تشكيلها على الساخن.

## سبائك النحاس الأصفر التي تشكل على البارد:

هي عبارة عن السبائك التي تحتوي بصورة أساسية على الطور ألفا ( $\alpha$ ). وكذلك يمكن إجراء التشكيل على البارد على جزء من السبائك المحتوية على الطورين  $\alpha + \beta$  والتي تكون فيها نسبة قليلة من  $\beta$ . ويجب أن تكون هذه السبائك ذات درجة نقاوة عالية لأن الشوائب وإذا كانت بنسب بسيطة فإنها تؤدي إلى خفض المطيلية.

قبل التشكيل على البارد يجب تخمير سبائك النحاس الأصفر التي تحتوي على الطور ألفا  $\alpha$  عند درجة حرارة  $600^{\circ}\text{C}$ ، أما إذا زادت عن  $750^{\circ}\text{C}$  فإنه يحدث نمو للحبيبات ويكون سريعاً.

من المشاكل التي تواجه التشكيل على البارد ظاهرة تسمى بالشروخ الموسمية Season Cracking وهي عبارة عن تشققات وشروخ تظهر عند حدود الحبيبات أثناء التشكيل على البارد. ويمكن التغلب على هذه المشكلة بإجراء عملية تخمير لإزالة الإجهادات وتتم عملية التخمير عند درجة حرارة  $250^{\circ}\text{C}$ .

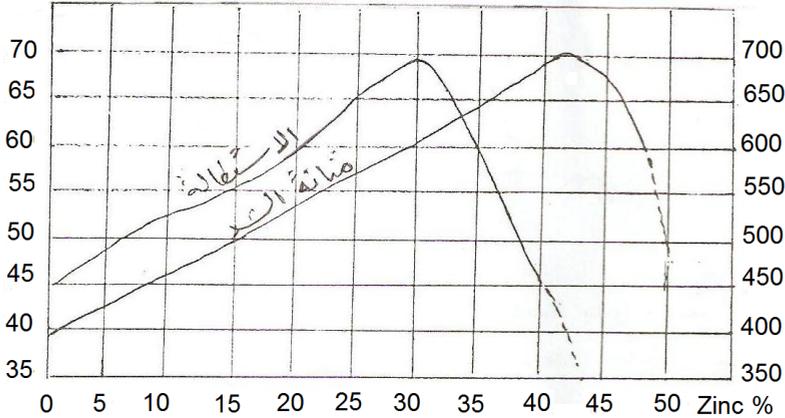
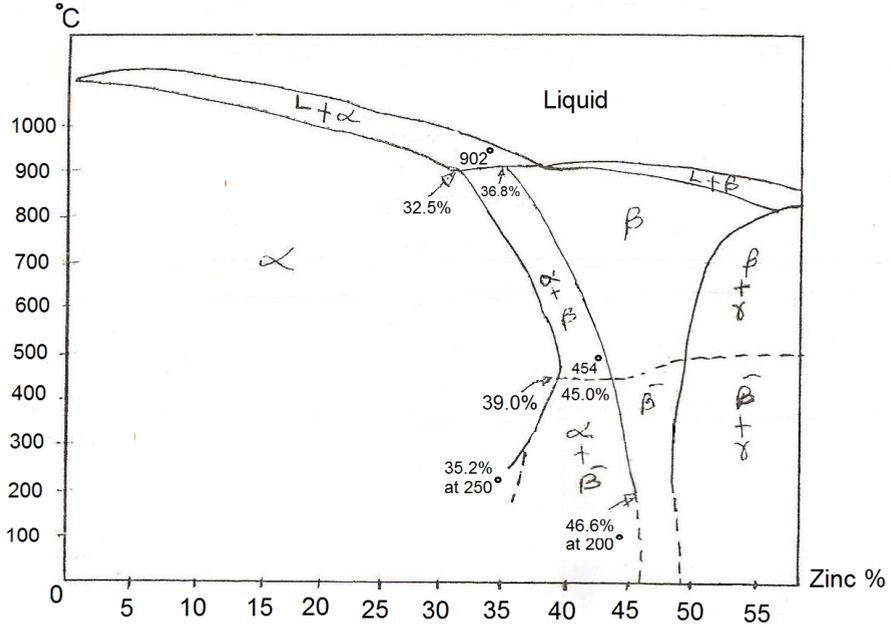
## سبائك النحاس الأصفر المشكولة على الساخن:

تشمل سبائك النحاس الأصفر التي تحتوي على الطورين  $\alpha + \beta$ . ومن أهم هذه السبائك السبيكة 40-60 والتي تعرف بمعدن مونتز Muntz Metal. وتمتاز هذه السبيكة بأنه عند التسخين إلى درجة حرارة حوالي  $750^{\circ}\text{C}$  فإن الصنف  $\alpha$  يذوب كلية في  $\beta$  مما يعطي مجالاً للتشكيل على الساخن.

## إضافة العناصر إلى سبائك النحاس الأصفر:

قد تضاف عناصر أخرى بنسب بسيطة لسبائك النحاس الأصفر لتحسين مقاومتها للتآكل الكيميائي أو الخواص الميكانيكية. فالقصدير يضاف بنسبة 1% لتحسين المقاومة للتآكل الكيميائي خاصة سبائك النحاس البحري. كما يمكن إضافة الزرنيخ بنسب 0.05%-1% لسبيكة النحاس الأصفر 30-70 المستخدمة في أنابيب المكثفات وذلك لتحسين المقاومة ضد التآكل الكيميائي ومنع انفصال الزنك.

إضافة الرصاص بنسبة 2% يساعد على تحسين خواص القطع بالماكينات (لأنه يذوب في النحاس الأصفر ويوجد على هيئة كريات). وتسمى السبيكة 40-60 والتي تحتوي على 2% رصاص بسبيكة النحاس الأصفر حرة القطع.



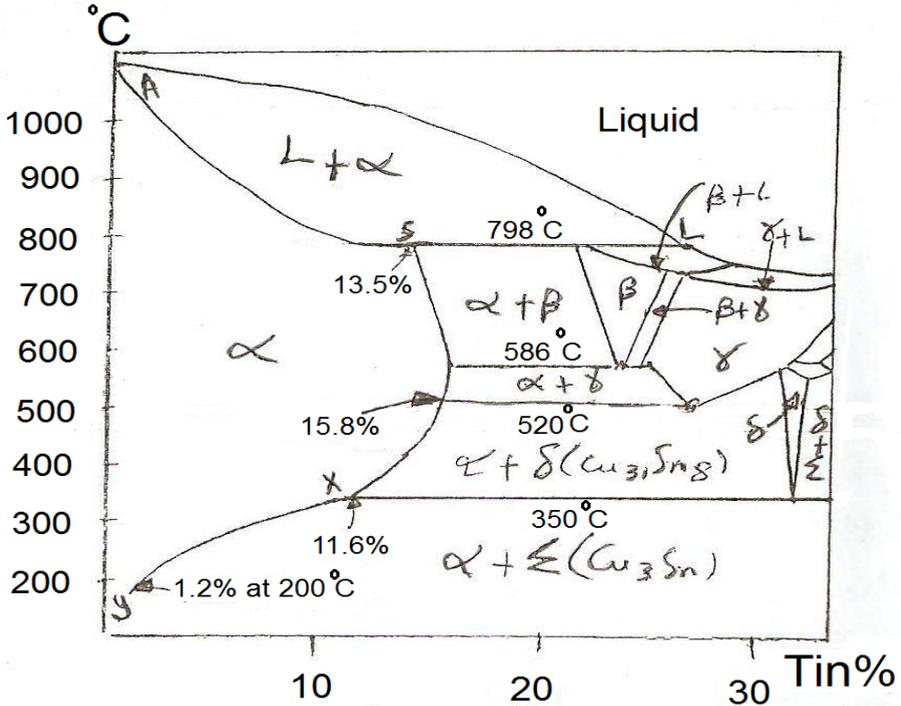
نسبة الاستطالة

الشكل (1) منحنى التوازن الحراري للنحاس والزنك المنحني الأسفل يبين العلاقة بين التركيب والخواص الميكانيكية

2. سبائك البرونز القصديري: Bronze

العلاقة بين منحنى التوازن الحراري والبنية الداخلية الفعلية لسبائك البرونز القصديري أكثر تعقيداً عن سبائك النحاس الأصفر وذلك لأن معدل انتشار كل من النحاس والقصدير في بعضهما أقل بكثير من النحاس والزنك، ويبدو ذلك في اتساع

المجال في التركيب الكيميائي عند أي درجة حرارة بين خطوط السيولة AL والصلابة AS كما في الشكل (2). كذلك نجد أن التغيرات في البنية الداخلية تحت درجة الحرارة 400 °C تحدث ببطء شديد. ويؤدي كلامن هذين العاملين إلى تشوه بعض البنية الداخلية التي تختلف عن تلك المبينة في منحنى التوازن الحراري للبرونز المسبوك المبرد حتى درجة حرارة الغرفة تحت الظروف الصناعية الإعتيادية.



الشكل (2) منحنى التوازن الحراري للنحاس والقصدير

بالرجوع إلى المنحنى يمكن ملاحظة التفاعلات التالية:

- يحدث التفاعل البيروتيكتيكي  $\alpha+L \rightarrow \beta$  عند درجة حرارة 798 °C
- يحدث التفاعل الأيوكتويدي  $\beta \rightarrow \gamma+\alpha$  عند درجة حرارة 589 °C
- يحدث التفاعل الأيوكتويدي  $\gamma \rightarrow \delta+\alpha$  عند درجة حرارة 520 °C
- عند التبريد البطيء جدا وعند درجات حرارة أقل من 350 °C فإن الطور  $\delta$  يتحلل إلى  $\Sigma+\alpha$  ، هذا ما لا يمكن تحقيقه صناعيا (معدل تبريد أسرع). لذلك فإن الطور  $\Sigma$  ( $Cu_3Sn$ ) لا يمكن رؤيته في البنية الداخلية للبرونز المصبوب في المسبك، لذا يمكن إهمال الجزء من المنحنى تحت 400 °C.

تصنيف سبائك البرونز القصديري:

هنالك عدة أنواع من البرونز القصديري أهمها:

سبائك البرونز القصديري البسيطة:

وهي سبائك يمكن أن تكون طروقة (مشكلة) أو مصبوبة حيث تحتوي الأولى على نسب قصدير حتى 7% والثانية حتى 18%، وتخلو السبائك المطروقة من الطور دلتا  $\delta$  ( $Cu_{31}Sn_8$ ) مما يجعلها قابلة لعمليات التشكيل على البارد. وتستخدم سبائك الصب في صناعة كراسي التحميل وذلك لمقاومتها للإحتكاك ومقاومة الصدمات.

سبائك البرونز الفسفوري:

وهي سبائك تحتوي على فسفور مضاف كعنصر سبائكي بنسب تتراوح بين 0.1%-1%. وتحتوي سبائك البرونز الفسفوري الطروق حتى 8% قصدير و0.3% فسفور، أما سبائك البرونز الفسفوري المصبوب فتحتوي على 13% قصدير و1% فسفور. ويوجد الفسفور على هيئة فسفيد النحاس  $Cu_3P$  والذي يكون مع  $\alpha$  و  $\delta$  يوتكتويد ثلاثي.

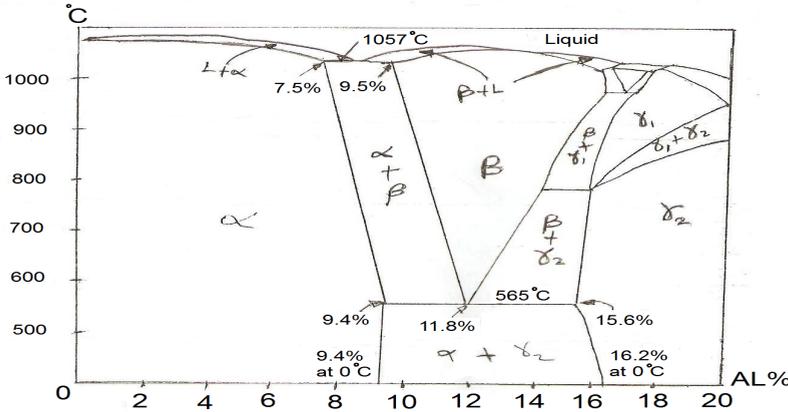
سبائك البرونز المحتوية على الزنك:

جميع سبائك البرونز المحتوية على الزنك تكون من الصنف  $\alpha$ . وهي أيضا نوعين سبائك طروقة وسبائك صب. تستخدم السبائك الطروقة في تصنيع العملة وتحتوي على 3% قصدير و2.5% زنك.

سبائك البرونز المحتوية على الرصاص:

يضاف الرصاص لسبائك البرونز بنسب تصل إلى 2% لتحسين خواص التشغيل بالماكينات، وتضاف نسب أعلى من ذلك لكراسي المحاور الخاصة.

### 3. سبائك البرونز الألومنيومي: Aluminum Bronze



الشكل (3) منحنى التوازن الحراري للنحاس والألمونيوم

الشكل (3) يوضح منحنى التوازن الحراري لسبائك البرونز الألمونيوم. وفي هذا المنحنى نجد أن المحلول الصلب ألفا ( $\alpha$ ) يتكون من نسب الألمونيوم 9.4% عند درجة حرارة الغرفة ويمتاز المحلول  $\alpha$  بمطيليه عالية. بزيادة نسبة الألمونيوم عن 9.4% فإن الطور  $\gamma_2$  ( $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ ) يتكون ويمتاز هذا الطور بالصلادة والهشاشة. نجد أن هنالك تشابهاً بين منحنى البرونز الألمونيومي ومنحنى الحديد والكربون، فالصنفين  $\alpha$  والفيريت متناظران والمحلول الصلب بيتا ( $\beta$ ) في منحنى النحاس والألمونيوم يشابه الأوستنايت في منحنى الحديد والكربون، والأيوكتويد  $\gamma_2$  يشبه الأيوكتويد فيرايت وسمنتايت (البيرايت) من الصلب. نتيجة لذلك فإن البرونز الألمونيومي المحتوي على 10% ألمونيوم يمكن معالجته بطريقة مماثلة للصلب.

البرونز الألمونيومي المحتوي على 10% إذا تم تبريده ببطء حتى درجة حرارة الغرفة يتكون كلية من الأصناف  $\gamma_2 + \alpha$ . إما إذا أعيد التسخين فإن الأيوكتويد  $\gamma_2 + \alpha$  يتحول إلى المحلول الصلب  $\beta$  عند الوصول إلى درجة حرارة الأيوكتويد  $565^\circ\text{C}$ . وبارتفاع درجة الحرارة لأعلى من ذلك فإن الطور  $\beta$  يبدأ في الإنصهار. يؤدي التبريد المفاجئ في الماء للطور  $\beta$  للحصول على بنية مكونه كلياً من الصنف  $\beta$  وهي بنية صلدة وهشه مشابهة للمارتنسايت، وتؤدي المراجعة إلى ترسيب خليط من الأصناف  $\gamma_2 + \alpha$ .

إلى جانب إمكانية المعالجة الحرارية فإن استخدام البرونز الألمونيومي يعتمد على عوامل أخرى منها:

1. القدرة على الإحتفاظ بالمتانة عند درجات الحرارة العالية بوجود بعض العناصر الأخرى.
2. مقاومة عالية للتأكسد عند درجة الحرارة العالية.
3. مقاومته الجيدة للتآكل الكيميائي عند درجات الحرارة العالية.
4. مقاومة جيدة للإحتكاك.
5. اللون الأصفر الذي يجعل بعض تلك السبائك مفيداً لأغراض الزينة خاصة كبديل للذهب في تقليد المجوهرات.

يمكن تصنيف سبائك البرونز الألمونيومي حسب طرق التصنيع :

- (1) السبائك القابلة للتشكيل على البارد هي المحتوية على الطور  $\alpha$  وتحتوي على حوالي 4%-7% ألمونيوم وفي بعض الأحيان تحتوي على النيكل حتى 4% وهو العنصر الذي يحسن مقاومة التآكل الكيميائي بدرجة كبيرة.

(2) السبائك القابلة للتشكيل على الساخن أو المنتجة بالصب هي المحتوية على الطورين  $\gamma_2 + \alpha$  وتحتوي على نسب ألومنيوم بين 7%-12%، وقد تحتوي على عناصر أخرى مثل الحديد والنيكل والمنجنيز. وتصل نسبة الحديد والنيكل إلى 5% في السبائك التي تستخدم في أغراض الهندسة الكيميائية خاصة للأجزاء المعرضة لدرجات حرارة عالية.

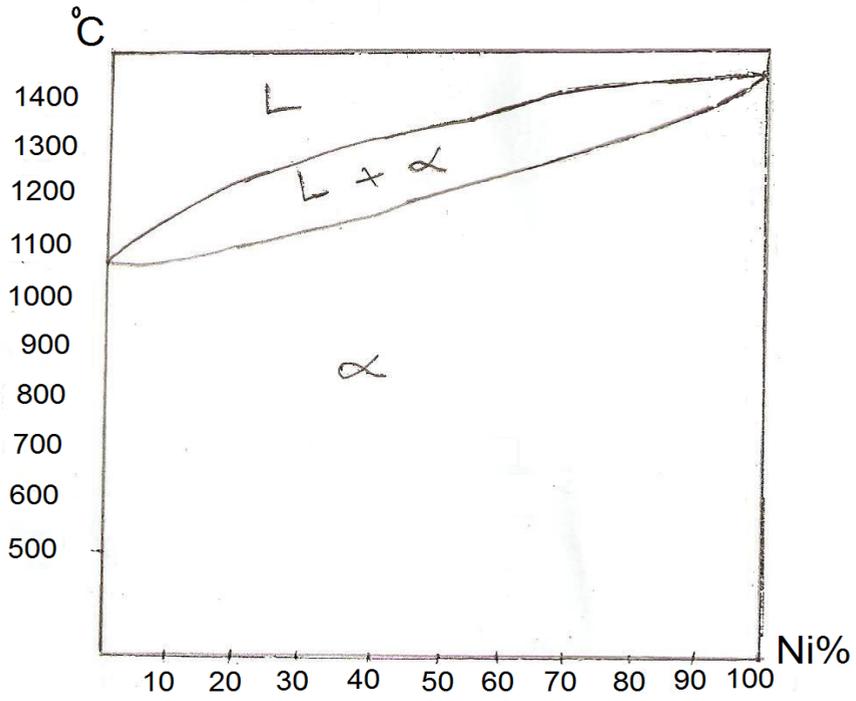
(3) السبائك المستخدمة في السبائك الرملية والقوالب الدائمة وتحتوي على حوالي 9.5%-12% ألومنيوم مع نسب مختلفة من الحديد والنيكل حتى 5% لكل منهما وتحتوي على المنجنيز بنسبة 1.5%. وتستخدم هذه السبائك بكثرة في الهندسة البحرية مثل أعمدة المضخات والرفاسات وأعمدة الرفاسات واللواب.

#### 4. سبائك النحاس والنيكل: Nickel Copper

الشكل (4) يوضح منحى التوازن لسبيكة النحاس والنيكل. ومنه يتضح أن لمعدني النحاس والنيكل خاصية الذوبان التام في بعضهما في جميع الأحوال بجميع النسب، أي أن المعدنين تامي الإذابة في الحالة الصلبة والحالة السائلة ويكونان محاليل صلبة في حالة الصب. هذه المحاليل تكون متجانسة وذات مطيلية جيدة يمكن تشكيلها على البارد أو على الساخن بالدرفلة أو السحب.

تخلو هذه السبيكة من أي صنف ثانوي في البنية الداخلية لذلك فهي ذات مقاومة عالية للتآكل في وجود المحاليل الكيميائية، ويمكن إضافة بعض العناصر لهذه السبيكة للحصول على خواص مثل سبائك النيكل الفضي التي تتكون من 10%-30% نيكل و 63%-65% نحاس والباقي من الزنك، وتستخدم هذه السبيكة الفضية اللون في صنع وطلاء الملاعق وأدوات المائدة الأخرى وأدوات الزينة.

هنالك أيضا سبائك المونيل والتي تحتوي على 30%-70% نيكل و 30% نحاس وعناصر أخرى مثل الحديد والمنجنيز وغيرها. وتمتاز هذه السبيكة بالمقاومة العالية للتآكل تحت تأثير الأحماض المعدنية وتستخدم في صناعة أدوات المطبخ ومكائن الغسيل ومحاور المضخات وغيرها. كذلك يمكن إضافة عنصر الكبريت إلى مكونات السبيكة لتحسين قابلية التشغيل.



الشكل (4) منحنى التوازن الحراري للنحاس والنيكل

## الفصل الثاني الألومنيوم وسبائكه

### Aluminum and Aluminum Alloys

#### مقدمة:

الألومنيوم من المعادن التي توجد بكثرة في القشرة الأرضية ومن أهم خاماته البوكسيت (أكسيد الألومنيوم). ومن الخواص التي تؤثر بشدة في استعماله في الصناعة والحياة العملية:

#### (1) خفة الوزن:

كثافته النسبية  $2.7 \text{ kg/m}^3$  وهي حوالي ثلث كثافة الحديد ( $7.89 \text{ kg/m}^3$ ) وسبائك النحاس ( $8.89 \text{ kg/m}^3$ ) مما يجعله خفيف الوزن لذلك يستعمل بكثرة في صناعة الطائرات والفضاء وبعض أجزاء السيارات ووسائل النقل الأخرى. كما أن سبائكه بعد إضافة عناصر سبائكية وإجراء بعض المعالجات الحرارية يمكن أن تكون أقوى من الصلب (على أساس الوزن للوزن).

#### (2) إفتة الشديدة للأكسجين:

وهي خاصية تعد ضارة ونافعة في نفس الوقت. وضرر هذه الخاصية يتمثل في الزيادة في تكلفة إستخلاص المعدن نفسه التي تفرضها طريقة التحليل الكهربائي. فعادة ما يستخلص أي معدن بتسخين خاماته (وهي في معظمها عبارة عن أكاسيد) مع عامل مختزل رخيص مثل الكربون (على صورة فحم الكوك) وينقى المعدن الخام الناتج بأكسدة الشوائب الموجودة فيه بواسطة الهواء والإضافات الأخرى (كما في حالة استخلاص الحديد الغفل Pig iron). لكن الألومنيوم له إلفه للأكسجين أكبر من الكربون لذلك يستخلص اقتصاديا بالتحليل الكهربائي فقط في عملية كيميائية طويلة ومكلفة.

منفعة هذه الخاصية تتمثل في أن الألومنيوم يقاوم التآكل والصدأ مقاومة كبيرة ويرجع ذلك إلى تكوين طبقة رقيقة من الأكسيد المتناسك على سطح المعدن تمنع استمرار تأثره بالأكسجين وهي غير مسامية لا تنفذ الماء والمحاليل الأخرى. ويمكن تدعيم هذه المقاومة بزيادة سمك طبقة الأكسيد على السطح بطريقة صناعية ويمكن تلوينها بالأصباغ العضوية أو الغير عضوية.

تستعمل قابلية الألومنيوم الشديدة للأكسجين كذلك في صناعة الصلب حيث يعمل على اختزال الأكسجين من الصبة وكذلك في عمليات لحام التيرميت.

### (3) توصيله الجيد للكهرباء:

يتمتع بخاصية التوصيل التي تصل إلى 50% من توصيل النحاس وإذا أخذ في الاعتبار الفرق في الوزن بين المعدنين فإنه يفضل النحاس في عمليات التوصيل الكهربائي لذلك يستخدم في صناعة الكابلات الكهربائية وعادة ما يكون مجدول حول قضيب من الفولاذ لتقويته.

### سبائك الألمنيوم: Aluminum alloy

الألمنيوم النقي يمتاز باللدانة والمطيلية العاليتين وهو ضعيف (قوة الشد حوالي  $90\text{N/mm}^2$ ) وله استخدامات قليلة تنحصر في التغليف وبعض أدوات المطبخ، لذلك تضاف إليه بعض العناصر السبائكية لتحسين الخواص الميكانيكية مثل قوة الشد والصلادة والتماسك والتشغيلية وفي بعض الأحيان لتحسين السيولة وخواص السبائك الأخرى. وهذه العناصر إما أن:

❖ تكون محاليل صلبة مع الألمنيوم.

❖ مركبات كيميائية مع الألمنيوم.

❖ مركبات كيميائية مع بعضها البعض.

تستخدم سبائك الألمنيوم إما في صورة مسبوكات أو مطروقات (تشكيل) ويمكن تحسين خواص العديد منها بعملية التصليد بالترسيب. وحسب استخداماتها تقسم إلى أربعة مجموعات:

1. السبائك المطاوعة التي لا تعالج حرارياً.

2. السبائك المسبوكة التي لا تعالج حرارياً.

3. السبائك المطاوعة التي تعالج حرارياً.

4. السبائك المسبوكة التي تعالج حرارياً.

### السبائك المطاوعة التي لا تعالج حرارياً: Wrought alloy which are not

### heat-treated

أهم المتطلبات في هذه السبائك القوة الكافية والمتانة ومقاومة جيدة للتآكل. يتم الحصول على الخواص الميكانيكية المطلوبة لهذه السبائك بالتشكيل على البارد لكن بمجرد تشكيلها فإنه لا يمكن تغيير خواصها الميكانيكية بعد ذلك. من أمثلة هذه السبائك سبيكة الألمنيوم مغنيسيوم. وجود المغنيسيوم بنسبة عالية يحسن من مقاومة التآكل لمياه وجو البحر لذلك تستخدم في الإنشاءات البحرية مثل السفن والغواصات.

زيادة نسبة المغنيسيوم تحد من عملية التشكيل على البارد لذلك لا بد من تحديد نسبته في السبيكة.

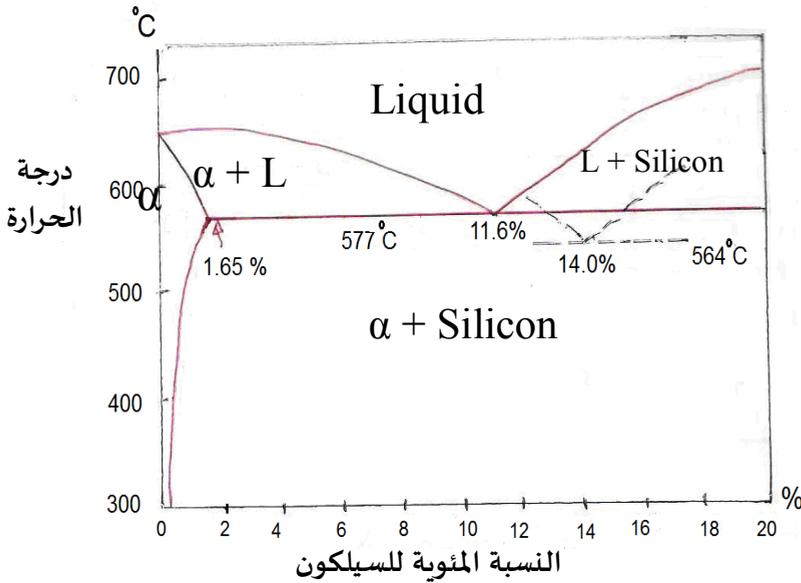
### السبائك المسبوكة التي لا تعالج حراريا: Cast alloy which are not heat-

#### treated

هذه المجموعة من السبائك تشمل تلك التي تستعمل في الأغراض العامة بالسباكة في الرمل والقوالب الدائمة. وتستخدم عندما تكون خواص السيولة في السباكة ومقاومة التآكل أهم من المتانة. أهم السبائك المستخدمة في هذه المجموعة هي التي تحتوي على ما بين 9%-13% سليكون مع قليل من النحاس.

إضافة السليكون يزيد من السيولة للألمنيوم ويكون الأيوتكتيك كما في الشكل (1) الأمر الذي يجعل مجال التجمد قليل ويحسن قابلية السباكة. لكن زيادة طور السيلكون يزيد من القسافة.

لتجنب قسافة السيلكون يمكن تهذيب بنية الأيوتكتيك بعملية تسمى التعديل Modification، وهي تتلخص في إضافة قليل من الصوديوم (حوالي 0.1%) للمصهور قبل الصب. هذا يؤدي إلى تأخير ترسب السيلكون عندما يصل المنصهر درجة حرارة الأيوتكتيك إلى اليمين من منحنى الإتزان. على ذلك يمكن أن تضاف نسبة سيلكون حتى 14% للسبيكة المعدلة دون أن يوجد سيلكون أولى في البنية النهائية.



الشكل (1) منحنى الاتزان الحراري للألمنيوم والسيلكون موضعا به تأثير عملية التعديل

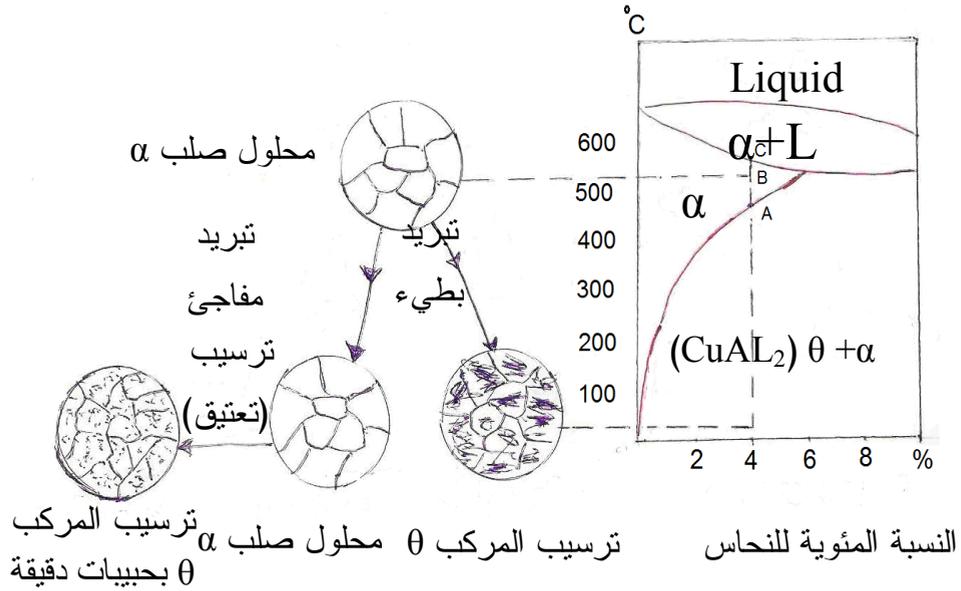
## السبائك المطاوعة التي تعالج حرارياً: Wrought alloy which heat-treated

بعض سبائك الألمنيوم تستجيب للمعالجة الحرارية وتتغير خواصها الميكانيكية تبعاً لذلك مثل السبيكة التي تحتوي على بعض المغنيسيوم والسيلكون والنحاس عندما تطفأ (تبرد فجأة) في الماء من درجة حرارة حوالي  $500^{\circ}\text{C}$  فإنها تزداد صلابتها عند تركها في درجة حرارة الغرفة لعدة أيام وتصل قوة السبيكة إلى الحد الأقصى بعد أسبوع وتسمى هذه العملية بالتصليد بالترسيب أو التعتيق. ويمكن الإسراع في عملية التعتيق بتسخين السبيكة لدرجة تصل إلى  $180^{\circ}\text{C}$  فيما يعرف بالتعتيق الصناعي.

مثلاً سبيكة الألمنيوم نحاس التي تحتوي على 4% نحاس الشكل (14.2)، هذه السبيكة عند درجة حرارة أعلى من  $500^{\circ}\text{C}$  تكون بنيتها من المحلول الصلب  $\alpha$ . إذا بردت ببطء وإتزان عند النقطة A يبدأ الطور  $\theta$  (المركب  $\text{CuAl}_2$ ) في التكوين ويستمر حتى درجة حرارة الغرفة ويكون راسباً ذو حبيبات كبيرة وتكون السبيكة قصفية. إذا أعيد تسخين السبيكة ببطء مرة أخرى فإن حبيبات الطور  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) تذوب تدريجياً حتى النقطة A فيعود المحلول الصلب  $\alpha$  مرة أخرى.

عند إطفاء السبيكة في الماء (تبريد مفاجئ) فإن الطور  $\theta$  لا يجد الوقت الكافي للترسيب ونحتفظ بالنحاس ذائباً في المحلول مكوناً محلول فوق الإشباع مع الألمنيوم عند درجة حرارة الغرفة. في هذه الحالة تكون السبيكة أصلد وأمتن قليلاً نظراً لوجود النحاس في المحلول الصلب، كذلك تكون أكثر مطيلية لعدم وجود حبيبات الراسب  $\theta$ .

إذا تركت السبيكة بعد ذلك عند درجة حرارة الغرفة تزداد صلابتها ومتانتها تدريجياً حتى تصل الحد الأقصى بعد 6 أيام، ويرجع ذلك لأن السبيكة تكون غير مستقرة ويبدأ الطور  $\theta$  في الترسب مرة أخرى في هذه الحالة داخل حبيبات المحلول الصلب  $\alpha$  مما يؤدي إلى زيادة المتانة والصلادة ونقص المطيلية بالطبع، وذلك لأن حبيباته تكون دقيقة ومنتظمة.



الشكل (2) جزء من منحنى الاتزان لسبيكة الألمنيوم والنحاس مبينا فيه أثر التبريد البطيء والتصليد بالترسيب على البنية

### السبائك المسبوكة التي تعالج حرارياً: Cast alloy which heat-treated

معظم هذه السبائك من النوع الذي يحتوي على 4% نحاس والبعض يحتوي على 2% نيكل بالإضافة لذلك. التصليد بالترسيب يرجع إلى تأثير وجود المركبين المعدنيين  $\text{CuAl}_2$  و  $\text{NiAl}_3$ . أشهر أنواع هذه السبائك ما يعرف تجارياً بإسم  $\gamma$  وهي سبيكة تحتوي على 4% نحاس و 2% نيكل و 1.5% مغنيسيوم وتستخدم في الأغراض التي تتطلب متانة عند درجات الحرارة المرتفعة كما هو الحال في البساتم والسلندرات.



# الباب الرابع

## فشل المواد الهندسية

### Material Failure



# الفصل الأول

## طرق فشل المواد الهندسية أثناء الاستعمال

### Method of Material Failure in Service

#### مقدمة: Introduction

الفشل هو عجز الجزء عن أداء مهامه أو عدم مقدرة الجزء على أداء وظيفته التي من أجلها صمم . وفشل المواد الهندسية غالبا ما يكون غير مرغوب فيه لعدد من الأسباب:

- يعرض حياة البشر للمخاطر.
  - فقد من الناحية الاقتصادية.
  - يؤثر على جاهزية وأداء المنتج أو الخدمة.
- وبالرغم من أن أسباب الفشل وسلوك المواد قد يكون معلوم إلا أن الوقاية من طرق الفشل المختلفة قد يكون صعب الضمان. وأسباب الفشل المعتادة هي:

- الاختيار الغير مناسب للمواد.
  - الاختيار الغير مناسب لطرق التصنيع والمعالجة.
  - التصميم الغير ملائم للجزء.
  - سوء الاستعمال (ظروف الاستعمال).
- أيضا الفشل يمكن أن يحدث لأجزاء البنية الهندسية خلال الخدمة وعمليات الفحص القياسي والصيانة أو تبديل الأجزاء مهم جدا لسلامة التصميم.

#### لماذا يدرس فشل المواد الهندسية: Why Study Failure

،وتصميم أي جزء أو بنية هندسية يتطلب من المهندس تقليل إمكانية الفشل والانهيار. لذلك لا بد له من فهم آلية **mechanics** حدوث طرق الفشل المختلفة من كسر وتمزق و فشل كلالي وزحف ... الخ. إضافة لذلك لا بد للمهندس من أن يكون على دراية بأساسيات التصميم التي تستخدم للوقاية من الفشل أثناء الاستخدام. مسؤولية المهندس أن يتوقع ويخطط للفشل المحتمل (حتى إذا لم يحدث) وان يقيم أسبابه ومن ثم يتخذ التدابير الوقائية المناسبة لمنع الحوادث المستقبلية.

#### طرق الفشل الأساسية:

تتعرض المواد الهندسية للفشل عند نهاية استعمالها تحت تأثير اجهادات مختلفة أو درجات حرارة مختلفة أو تحت تأثير المناخ أو ظروف التشغيل أثناء الاستعمال. ويمكن للمواد الهندسية أن تفشل بعدة طرق أهمها:

- (١) الكسر والتمزق . Fracture and Rapture  
 (٢) الكلال والفشل الكلالي . Fatigue and Fatigue Failure  
 (٣) الزحف وفشل الزحف . Creep and Creep Failure  
 (٤) التآكسد والتآكل . Oxidation and Corrosion  
 (٥) الاحتكاك واليلى . Friction and Wear

### الكسر والتمزق : Fracture and Rapture

تتعرض المواد الهندسية للكسر والتمزق إذا تعرضت لتسليط اجهادات اكبر من الإجهادات المقاومة للشد أثناء استعمالها. ولكن تحت ظروف معينة - مثلا عند درجات الحرارة العالية - فان المواد الهندسية يمكن أن تتكسر وتتمزق عند استعمالها تحت اجهادات اقل من اجهادات مقاومة الشد للمادة أو حتى تحت اجهادات اقل من حد المرونة.

تختلف طريقة الكسر أو التمزق وشكلها من حالة إلى أخرى حسب الخواص الميكانيكية لتلك المادة ولكن عموما يتم الكسر والتمزق عندما يحدث كسر داخل كتلة المعدن فينمو ويزيد هذا الكسر بطول معين وبعده يسرع بسرعة فائقة ويؤدي إلى الكسر والتمزق بسرعة. عموما هنالك نوعان من الكسور والتمزق يمكن أن تحدث للمواد الهندسية عند تسليط اجهادات شد أو اجهادات ضغط عليها:

١. الكسر القصفي . Brittle Fracture

٢. الكسر المطيلي . Ductile Fracture

العوامل التي تؤثر على نوع الكسر : Factors effects the types of fracture

(١) معدل تسليط الحمل أو معدل الانفعال.

(٢) شكل القطعة وحالة سطحها.

(٣) درجة الحرارة.

(٤) قطر حبيبات المادة.

(٥) مكونات المادة.

### الكلال والفشل الكلالي : Fatigue and Fatigue Failure

يحدث الكلال عادة عندما تتعرض المواد الهندسية وخاصة المواد الفلزية لاجهادات دورية Cycle stress. يمكن أن يحدث التصدع الكلالي تحت تأثير اجهادات دورية اقل من مقاومة الشد Tensile stress وأحيانا حتى اقل من مقاومة الخضوع للمادة.

بالنظر إلى استعمالات المواد الهندسية فإن الغالبية العظمى منها تقع تحت تأثير الإجهادات الدورية مثل اسطوانات الضغط والأعمدة الدوارة وريش التوربينات واذرع التوصيل وأجنحة الطائرات وغيره. ويمثل التصدع الكلالي 80% إلى 90% من فشل المواد أثناء الاستعمال.

يحدث التصدع الكلالي دائما نتيجة لحدوث شقوق صغيرة ونموها تحت تأثير الإجهاد للطول الحرج ثم نموها بسرعة مؤدية إلى حدوث الفشل الكلالي في المادة. عند تسليط اجهادات دورية على المادة فإنها تتعاقب عادة بين اجهادات شد وضغط ويعتمد حدوث الشق ونموه والذي يأخذ وقتا طويلا على طريقة تسليط الإجهاد وسرعة الدوران.

عموما يحدث التصدع الكلالي كفشل قصفي ويتبعه تشوه لدن قليل جدا ونسبة لان الإجهادات تتعاقب على المادة بين الضغط والشد فمن الصعب جدا رؤية الشق الكلالي لذا فان التصدع الكلالي من اخطر أنواع الفشل لأنه يحدث فجأة.

### العوامل التي تؤثر على مقاومة الكلال: Factors effects the Fatigue failure

عوامل تتعلق بالمادة الهندسية:

(١) حجم الحبيبات.

(٢) المعالجات الحرارية.

(٣) المعالجات السطحية.

عوامل تتعلق بالبيئة وأوساط التشغيل:

(١) درجة الحرارة.

(٢) الفراغ.

(٣) الكلال التآكلي.

### الزحف وفشل الزحف: Creep and Creep Failure

الزحف هو تشوه بطئ يحدث مع مرور الزمن نتيجة لتأثير الأحمال عند درجات حرارة عالية. ويعرف الزحف بأنه مقدار الانفعال الذي يحدث بمرور الزمن عندما تتعرض المادة الهندسية لتسليط حمل أو إجهاد ثابت تحت تأثير درجة حرارة ثابتة. يمكن أن يحدث الزحف تحت تأثير كل درجات الحرارة التي هي أعلى من درجة حرارة الصفر المطلق ( $-273^{\circ}$ ).

درجة الحرارة التي يحدث عندها الزحف تعتمد على درجة انصهار المادة المعينة (Tm) فالمواد المعدنية يحدث لها الزحف إذا كانت درجة الحرارة اعلي من 0.3Tm أو 0.4Tm، أما المواد السيراميك فيحدث فيها الزحف تحت تأثير درجة حرارة أعلى من 0.4Tm أو 0.5Tm حيث Tm درجة انصهار المادة بالكلفين.

يمكن أن يحدث الزحف تحت تأثير اجهادات اقل من إجهاد الشد الأقصى أو تحت تأثير إجهاد اقل من إجهاد الخضوع. وانفعال الزحف يعتمد على الإجهاد أو الحمل والزمن ودرجة الحرارة.

$$\square = f(\sigma, T, t)$$

□ : انفعال الزحف.

σ : الإجهاد.

T : درجة الحرارة.

t : الزمن.

### التآكل والتأكسد : Oxidation and Corrosion

يمكن تعريف التآكل بأنه انهيار المواد الهندسية وخاصة المواد الفلزية نتيجة تفاعلها مع الجو المحيط بها ويتم ذلك طبيعياً، حيث تحاول المواد الفلزية العودة مرة أخرى إلى حالتها الطبيعية الأولى قبل تنقيتها.

هذا التعريف يفترض أن كل المواد الهندسية يحصل لها تآكل لكن بمعدلات مختلفة وبصور مختلفة حسب نوع المادة أو الجو المحيط بها.

من المعروف أن كل المواد الفلزية أو الغالبية العظمى منها توجد في الطبيعة في شكل اكاسيد. لتنقية هذه المواد تستعمل الطاقة الحرارية وبعد عملية التنقية تكون المادة المنقاة تحتوي على طاقة أعلى من الطاقة التي كانت بها قبل تنقيتها. تستعمل هذه الطاقة المكتسبة من عملية التنقية أثناء عملية التآكل لإرجاع المادة إلى صورتها الطبيعية.

عملية التآكل تعتمد على الطاقة المخزونة في المادة المكتسبة أثناء التنقية. تكتسب المواد الهندسية عدة أنواع من الطاقة ، وتعتبر الطاقة الكهربائية هي التي تؤدي إلى حدوث التآكل. عملية التآكل عملية غير عكسية فعندما يبدأ التآكل لا يمكن إرجاعه لأن التيار الكهربائي المار في المعدن هو تيار مستمر وليس متردد.

عملية التآكل عملية معقدة وتشترك فيها عدة عوامل تحدد سرعة ومعدل التآكل ويمكن تقسيمها إلى:

١. عوامل تتعلق بالمادة نفسها.
  ٢. عوامل تتعلق بالوسط المحيط بالمادة أثناء الاستعمال.
- العوامل المتعلقة بالمادة الهندسية:**
- (١) موقع المادة أو المعدن في السلسلة الكهروكيميائية.
  - (٢) تلاقى المواد المختلفة الغير متشابهة لاختلاف الشحنات الكهربائية.
  - (٣) البنية الداخلية للمادة ومدى نقاوتها.
  - (٤) وجود اجهادات داخلية ناشئة من عمليات التصنيع.
- العوامل المتعلقة بالوسط المحيط بالمادة أثناء الاستعمال:**
- (١) الرطوبة النسبية.
  - (٢) وجود الشوائب والأبخرة الكيميائية.
  - (٣) معدل توزيع الأكسجين.
  - (٤) وجود الإجهادات الخارجية الناتجة من عمليات التحميل.

### الاحتكاك والبلى: Friction and Wear

يمكن تعريف البري أو البلى بأنه العملية الميكانيكية التي يتم فيها إزالة المعدن أو نزع جزء من سطح المعدن أو المادة الهندسية. وبالنظر إلى عمل الأجزاء الهندسية نجد كثير منها تتحرك فوق بعضها البعض مثل حركة الكباس مع الاسطوانة وحركة عمود الدوران على كراسي التحميل. نتيجة لهذه الحركة يحدث الاحتكاك الذي يزيل جزء من سطح المعدن عند نقاط التلاقي بين القطعتين.

المساحة التي يتلاقى فيها أسطح القطعتين تكون صغيرة جدا (50%) مقارنة بمساحة السطح الكلية حيث يحدث التلاقي فقط في المساحات المرتفعة من سطح القطعتين.

عملية الاحتكاك غير مرغوب فيها أثناء حركة الأجزاء الهندسية مع بعضها البعض للأسباب الآتية:

١. جزء كبير من الطاقة يستهلك في مقاومة الاحتكاك.
٢. عملية الاحتكاك تؤدي إلى إزالة جزء من سطح المادة وبالتالي تغيير مقدار التفاوت المسموح به وتؤدي إلى زيادة الخلوص بين القطعتين وبالتالي اختلال عملهما.

# الفصل الثاني الكسر

## Fracture

### المبادئ الأساسية للكسر: Fundamentals of Fracture

الكسر البسيط هو انفصال الجسم لجزأين أو أكثر نتيجة لتعرضه لإجهاد استاتيكي (الحمل ثابت أو متغير ببطء مع الزمن) عند درجة حرارة تكون منخفضة نسبياً عن درجة انصهار المادة.

الكسر يمكن أن يحدث نتيجة للكلال (في حالة الإجهادات الدورية) أو الزحف (تشوه يعتمد على الزمن عند درجات الحرارة المرتفعة).

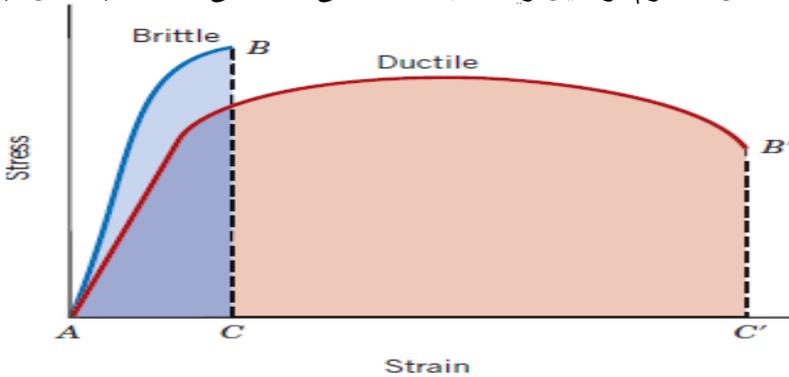
الإجهاد الذي يحدث الكسر يمكن أن يكون إجهاد شد **tensile** أو ضغط **compressive** أو قص **shear** أو لي **torsion** أو مركب من أكثر من نوع **combination** (النقاش يقتصر على الكسر الناتج من أحمال الشد في محور واحد **uniaxial tensile loads**).

في حالة المعادن هنالك نوعين محتملين من الكسر:

A. الكسر المطيلي. **Ductile Fracture**.

B. الكسر القصفي. **Brittle Fracture**.

هذا التصنيف مبني على قابلية المادة للتعرض للتشوه اللدن **plastic deformation**، حيث أن المعادن المطيلة تبدي تشوه لدن كبير يصاحبه امتصاص عالي للطاقة قبل الكسر. من ناحية أخرى فإن الكسر القصفي في العادة يكون فيه التشوه اللدن معدوم أو قليل وبصاحبه امتصاص منخفض للطاقة (الشكل ١).



**Figure 1** Schematic representations of tensile stress–strain behavior for brittle and ductile metals loaded to fracture.

الشكل (١) سلوك الإجهاد - الانفعال للمعادن القصفيه والمطيلية عند تحميلها حتى الكسر

مطيليه أو قصفافة الكسر حالة نسبية تعتمد على عدة عوامل منها:

• درجة حرارة المادة. **Temperature of material**

• معدل الانفعال. **Stain rate**

• حالة الإجهاد. **Stress state**

في العادة أي عملية كسر تتكون من مرحلتين:

A. تكون شق صغير. **Crack formation**

B. نمو الكسر استجابة للإجهاد المسلط. **Propagation in response to an**

**imposed stress**

أسلوب (طريقة) الكسر يعتمد اعتمادا كبيرا على آلية نمو الشق. فالكسر المطيلي يتميز بتشوه لدن واسع في المناطق المجاورة لمقدمة الشق والعملية تتقدم ببطء نسبيا مع زيادة طول الشق. في بعض الأحيان يكون الشق مستقر **stable** لأنه يقاوم أي زيادة في طوله ما لم تحدث زيادة في مقدار الإجهاد المسلط. بالإضافة لذلك يكون هنالك دليل على تشوه كثيف يمكن تقديره في سطح الكسر في شكل تمزق والتواءات.

في حالة الكسر القصفي التشققات تنتشر سريعا للغاية يصاحبها تشوه لدن قليل جدا، وبعض الشقوق يمكن أن يقال عنها غير مستقرة ونمو الشق عندما يبدأ يتواصل تلقائيا من غير أي زيادة في مقدار الإجهاد المسلط.

الكسر المطيلي دائما يفضل على القصفي لسببين:

أولاً: الكسر القصفي يحدث فجأة وبطريقة كارثية من غير أي تحذير ذلك نتيجة لتلقائية وسرعة نمو الشق، في حين انه في الكسر المطيلي وجود التشوه اللدن يعطي تحذير بان الفشل وشيك مما يسمح باتخاذ بعض التدابير الوقائية.

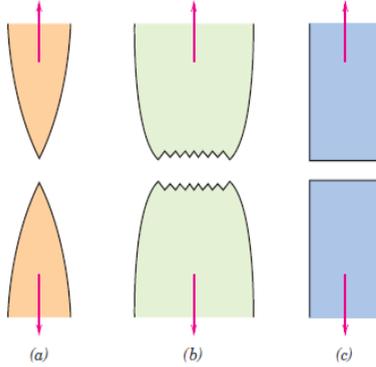
ثانياً: طاقة الانفعال المطلوبة لإحداث الكسر المطيلي تكون اكبر لان هذه المواد عموما متينة.

تحت تأثير إجهاد الشد معظم سبائك المعادن تكون مطيليه في حين أن المواد السيراميك قصفيه أما اللدائن فتبدي مدى واسع من السلوك.

### الكسر المطيلي: Ductile Fracture

أسطح الكسر المطيلي لها صفات مميزة في مستوى النظر بالعين المجردة أو المستوى المجهرى. الشكل (٢) عبارة عن رسومات توضيحية لما يبدو عليه الكسر عند النظر بالعين المجردة.

الرسم التوضيحي (الشكل ٢a) يوجد في حالة المواد الطرية للغاية مثل الذهب والرصاص النقيان عند درجة حرارة الغرفة والمعادن الأخرى واللدائن والزجاج الغير عضوي عند درجات الحرارة المرتفعة. وهذه المواد العالية المطيلية تتخصر إلى أن يصبح الكسر في شكل نقطة بحيث تظهر تخفيض في مساحة المقطع بنسبة 100% . النوع الأكثر شيوعا لكسر الشد للمعادن الطرية هو الممثل بالرسم (16.2b) حيث أن الكسر يسبقه مقدار معتدل من التخصر.



**Figure 2** (a) Highly ductile fracture in which the specimen necks down to a point. (b) Moderately ductile fracture after some necking. (c) Brittle fracture without any plastic deformation.

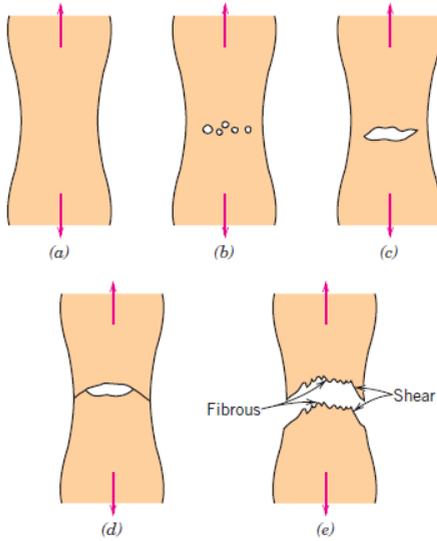
الشكل (٢) (a) كسر عالي المطيلية فيه تخصرت العينة بصوره حادة. (b) كسر معتدل المطيلية مع بعض التخصر. (c) كسر قصفي من غير أي تشوه لدن. النوع الأكثر شيوعا لكسر الشد للمعادن الطرية هو الممثل بالرسم (٢b) حيث أن الكسر يسبقه مقدار معتدل من التخصر.

عملية الكسر المطيلي عادة تحدث في مجموعة من المراحل كما يوضحه (الشكل ٣):

- بداية التخصر.
- تشكل تجاويف صغيرة وفجوات مجهرية في المقطع الداخلي.
- مع مواصلة التشوه تتوسع الفجوات المجهرية وتقترب من بعضها البعض ثم تندمج مكونة شق بيضاوي محوره الطويل يكون عموديا على اتجاه الإجهاد.
- الشق يواصل النمو في اتجاه موازي لمحوره الرئيسي عن طريق عملية اندماج الفجوات المجهرية.
- أخيرا ينشأ الكسر بواسطة النمو السريع للشق حول المحيط الخارجي للتخصر بواسطة تشوه قص عند زاوية حوالي  $45^\circ$  مع محور الشد - هذه الزاوية عند أقصى قيمة لإجهاد القص.

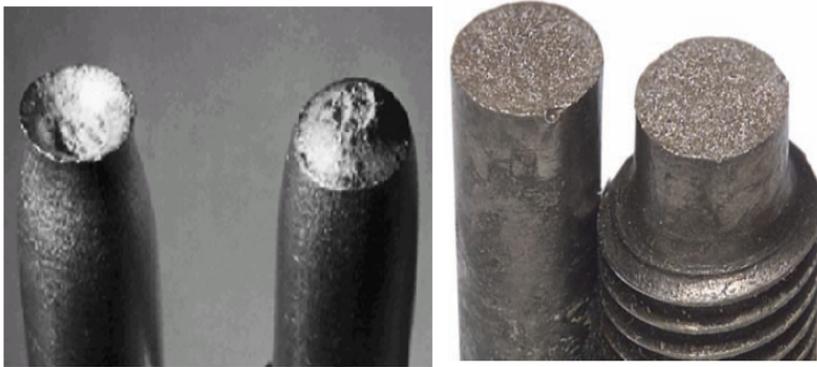
في بعض الأحيان الكسر المطيلي يتميز بمحيط سطح يطلق عليه كسر كوب-مخروط **cup-and-cone fracture** لان احد الأسطح الملتقية للكسر في شكل كوب والآخر في شكل مخروط.

في هذا النوع من عينات الكسر (الشكل ٤ a) المنطقة الداخلية الوسطى للسطح لها مظهر غير منتظم **irregular** وخشن **fibrous** مما يدل للتشوه اللدن.



**Figure 3** Stages in the cup-and-cone fracture. (a) Initial necking. (b) Small cavity formation. (c) Coalescence of cavities to form a crack. (d) Crack propagation. (e) Final shear fracture at a 45° angle relative to the tensile direction.

### الشكل (٣) مراحل الكسر المطيلي



(a)

(b)

**Figure 4** (a) Cup-and-cone fracture in aluminum.

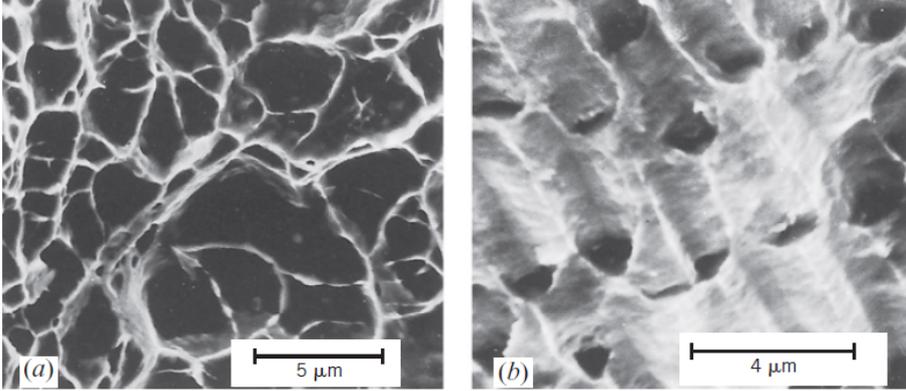
(b) Brittle fracture in a mild steel.

الشكل (٤) (a) كسر كوب-مخروط لعينه من الألمنيوم. (b) كسر قصفي لعينه

من الصلب.

## دراسة تخطيط (صورة) الكسر: Fractographic Studies

يمكن الحصول على معلومات إضافية مفصلة تتعلق بآلية الكسر عند الفحص المجهري باستخدام مجهر الكتروني، والدراسات من هذا النوع تعرف بتخطيط (صورة) الكسر Fractographic. والمجهر الالكتروني يفضل عن الضوئي لأنه يظهر الوصف الدقيق لأسطح الكسر لما يتميز به من ثبات و عمق ومجال تكبير للصورة.



**Figure 5** (a) Scanning electron fractograph showing spherical dimples characteristic of ductile fracture resulting from uniaxial tensile loads. 3300×. (b) Scanning electron fractograph showing parabolic-shaped dimples characteristic of ductile fracture resulting from shear loading. 5000×.

### الشكل (٥) تخطيط (صورة) Fractographic الكسر المطيلي بواسطة المجهر الالكتروني

عند فحص المناطق الوسطى الخشنة لسطح الكسر الكوب-مخروط باستخدام المجهر الالكتروني بتكبير عالي فإنها تحتوي على نقر (حفر) كروية Spherical dimples متعددة (الشكل ٥ a)، وهذه البنية تميز الكسر الناتج من إجهاد الشد في محور واحد، وكل نقرة عبارة عن نصف فجوة مجهريه نشأت ثم انفصلت خلال عملية الكسر.

النقر أيضا تنشأ في الكسر الكوب-مخروط عند حافة القص بزاوية 45° لكنها تستطيل أو تأخذ شكل الحرف C (C-shape) (الشكل ٥ b)، وهذا القطع المكافئ يدل على إجهاد القص.

يمكن أن يكون هنالك صور وهيئات مجهريه أخرى لسطح الكسر ودراسة تخطيط الكسر Fractographic كما في الشكل (٥) تعطي معلومات قيمة عند تحليل الكسر تظهر أسبابه مثل:

- أسلوب (طريقة) الكسر.

- حالة الإجهاد.
- مكان بداية الشق.

### الكسر القصفي: Brittle Fracture

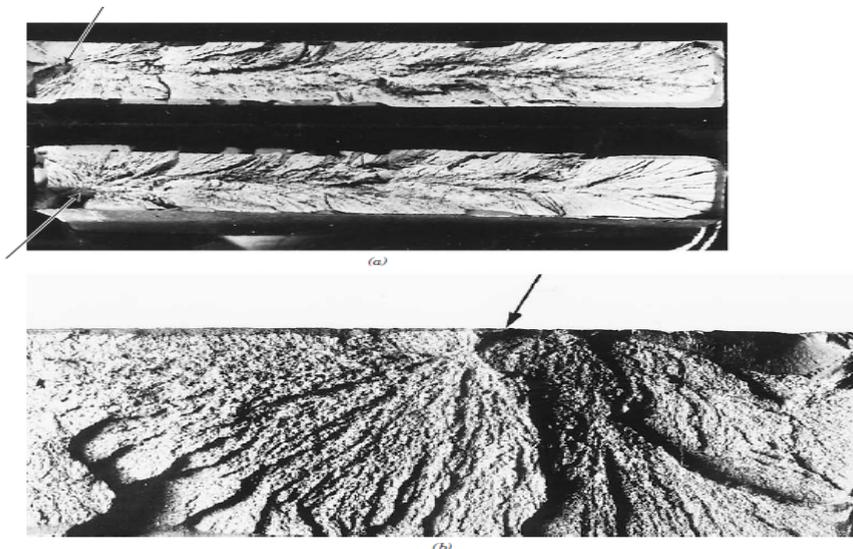
الكسر القصفي يحدث بنمو سريع للشق بدون تشوه ملحوظ واتجاه حركة الشق تكون تقريبا عمودية على اتجاه إجهاد الشد المسلط وتنتج سطح كسر مستوي نسبيا كما في الشكل ٢ c.

أسطح الكسر للمواد التي تقع تحت النمط القصفي لها نماذج مميزة لها وأي إشارة للتشوه الدن تكون غائبة. مثال لذلك في بعض قطع الفولاذ سلسلة من العلامات في شكل الحرف V (V-shape) تتشكل بالقرب من مركز مقطع الكسر تشير إلى مكان نشوء (بداية) الكسر (الشكل ٥ a).

بعض أسطح الكسر القصفي تحتوي على خطوط أو سلسلة تلال متشعبة من مصدر (أصل) الشق في شكل مروحة fanlike (الشكل ٦ b).

عادة هذين النموذجين يكونان خشنين كفاية ليريا بالعين المجردة، لكن المعادن الصلدة ذات الحبيبات الدقيقة جدا لا يكون هنالك نموذج مرئي لكسر.

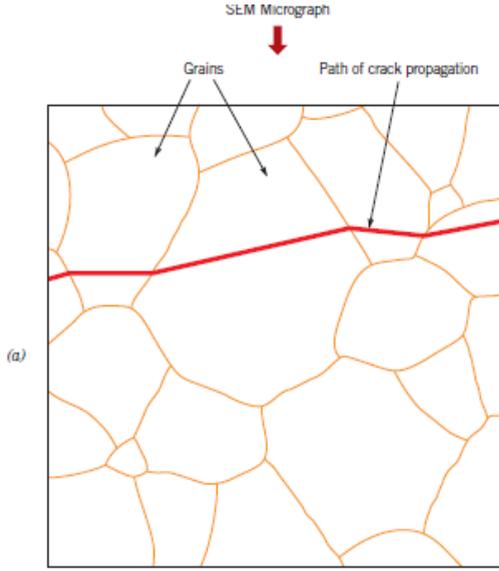
الكسر القصفي للمواد الغير بلورية amorphous مثل السيراميك والزجاج تنتج سطح مستوى ولامع نسبيا.



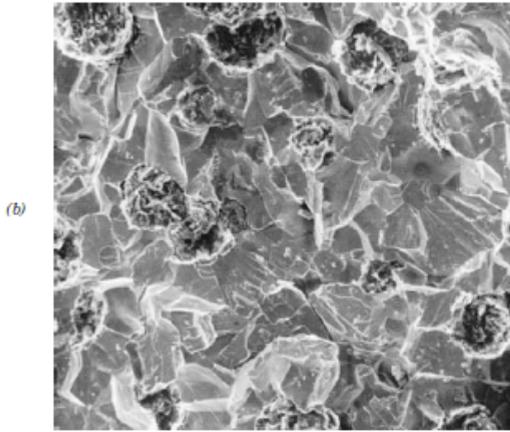
**Figure 6** (a) Photograph showing V-shaped "chevron" markings characteristic of brittle fracture. Arrows indicate origin of crack. Approximately actual size. (b) Photograph of a brittle fracture surface showing radial fan-shaped ridges. Arrow indicates origin of crack.

الشكل (٦) تخطيط (صورة) Fractographic الكسر القصفي بواسطة

المجهر الالكتروني

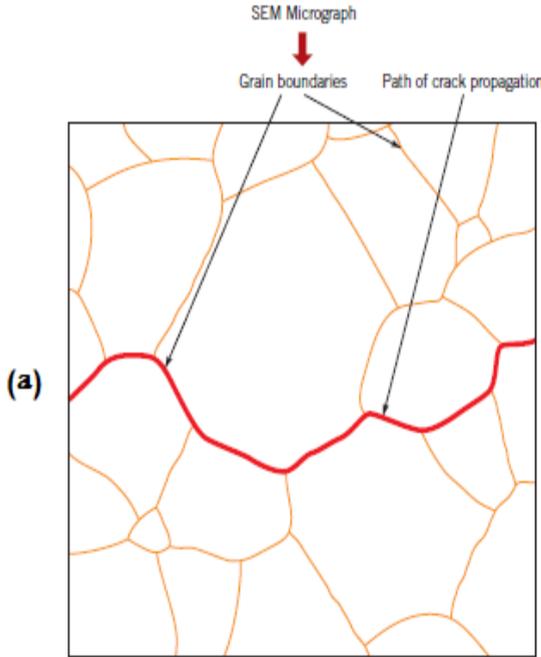


**Figure 7** (a) Schematic cross-section profile showing crack propagation through the interior of grains for transgranular fracture. (b) Scanning electron fractograph of ductile cast iron showing a transgranular fracture surface.

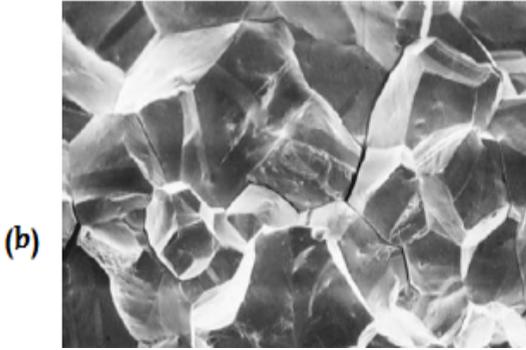


### الشكل (٧) الكسر خلال الحبيبات transgranular fracture

لمعظم المواد البلورية نمو الشق يكون مناظر للانفصال المتتابع والمتكرر للروابط الذرية خلال مستويات بلورية محددة (الشكل ٧ a) وهذه العملية تسمى انقسام cleavage . هذا النوع من الكسر يمكن أن يقال عنه كسر من خلال الحبيبات transgranular fracture لأن شقوق الكسر تمر من خلال الحبيبات. بالعين المجردة سطح الكسر يكون له تركيب حبيبي (الشكل ٤ b) كنتيجة لتغير مستويات الانقسام من حبيبة لحبيبة. هيئة الانقسام هذه ترى بتكبير عالي لمجهر الكتلوني كما في الشكل (٧ b) .



**Figure 8** (a) Schematic cross-section profile showing crack propagation along grain boundaries for intergranular fracture. (b) Scanning electron fractograph showing an intergranular fracture surface.



الشكل (٨) الكسر حدود الحبيبات intergranular fracture

لبعض السبائك نمو الشق يكون على امتداد الحدود الحبيبية (الشكل ٨ a) وهذه الهيئة تسمى بكسر حدود الحبيبات **intergranular fracture**. الشكل ٨ b) يظهر صورة كسر حدود الحبيبات بالمجهر الالكتروني حيث ترى الطبيعة ثلاثية الأبعاد 3D للحبيبات. هذا النوع من الكسر عادة يكون نتيجة تعقب حدوث عمليات تؤدي لإضعاف وقصافة مناطق الحدود الحبيبية.

# الفصل الثالث

## قواعد ميكانيكا الكسر

### Principles of Fracture Mechanics

#### مقدمة: Introduction

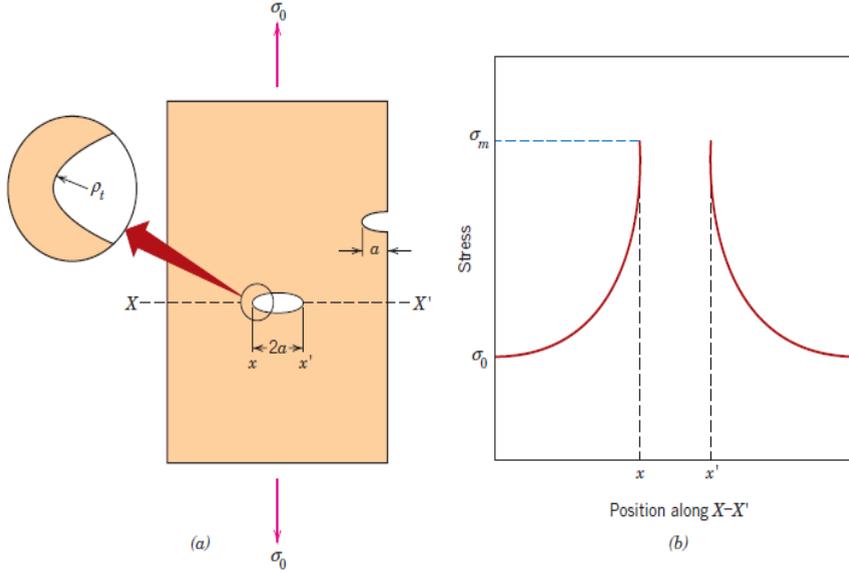
رغم إعمال قواعد التصميم للأداء وللمتانة إلا أنه حدثت حوادث كارثية خلال القرن السابق ناتجة من الفشل الغير المتوقع للمواد الهندسية (مثل الكسر القصفي للمواد التي في العادة تكون مطيلة) هذا بدوره اثبت الحوجه للفهم الجيد لآلية طرق الفشل مما قاد لمحاولات بحث واسعة قادت إلى ثورة في مجال فشل المواد الهندسية وجعلت مهندسي التصميم الآن مجهزين جيدا لتوقع الفشل في البنية الهندسية والوقاية منه.

النقاش الحالي متمركز على بعض المبادئ الأساسية لميكانيكا الكسر **Fracture Mechanics** والذي يعنى بالتقدير الكمي للعلاقات بين:

- خواص المواد . Material Properties
- مستوى الإجهاد. Stress Level
- وجود العيوب المنتجة للشق. The presence of crack-producing flaws
- آليات نمو الشق. Crack propagation mechanisms

#### تركيز الإجهاد: Stress concentration

مقدار متانة الكسر لمعظم المواد تكون اقل بكثير من المتنبأ بها بالحسابات النظرية المبنية على أساس طاقات الروابط الذرية. هذا يفسر بوجود عيوب مهجرية وشقوق على سطح وداخل جسم القطعة الهندسية في الظروف الطبيعية وهذه العيوب هي التي تحدد متانة الكسر لان الإجهاد المسلط يتركز **concentrated** وتكبر **amplified** قيمته عند مقدمتها ومقدار التكبير يعتمد على شكل واتجاه الشق. هذه الظاهرة تشرح بالشكل (١) الذي يوضح صورة جانبية للإجهاد لمقطع (X-X') يحتوي على شق داخلي. كما يشير هذا الشكل فان قيمة الإجهاد الموضعي تناقص كلما زادت المسافة من مقدمة الكسر حتى يصل لمواضع بعيدة يكون فيها الإجهاد مساوي للإجهاد العادي  $\sigma_0$  (الحمل المسلط مقسوم على مساحة مقطع العينة العمودية لهذا الحمل). ونسبة لقابليتها لتكبير الإجهاد موضعيا هذه العيوب تسمى روافع الإجهاد **stress raisers**.



**Figure 1** (a) The geometry of surface and internal cracks. (b) Schematic stress profile along the line  $X-X'$  in (a), demonstrating stress amplification at crack tip positions.

الشكل (١) تركيز الإجهاد في مقدمة الشقوق السطحية والداخلية

حساب الإجهاد الأقصى عند مقدمة الشق (لحمل الشد):

### Maximum Stress computation at crack tip for tensile loading

بافتراض أن الشق يأخذ شكل تجويف بيضاوي داخل لوح ويكون عموديا على الإجهاد المسلط فإن الإجهاد الأقصى  $\sigma_m$  يحدث عند مقدمة الشق ويكون تقريبا:

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left( \frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2} \quad (1)$$

حيث أن:

$\sigma_0$ : القيمة العادية لإجهاد الشد المسلط.

$\rho_t$ : نصف قطر الانحناء لمقدمة الشق.

$a$ : طول الشق السطحي أو نصف طول الشق الداخلي.

للشق المجري الطويل نسبيا الذي له نصف قطر انحناء صغير فإن المعامل

$(a/\rho_t)^{1/2}$  يكون كبير جدا، هذا ينتج قيمة  $\sigma_m$  تكون ضعف قيمة  $\sigma_0$ .

في بعض الأحيان النسبة  $\sigma_m / \sigma_0$  تعرف بمعامل تركيز الإجهاد  $K_t$  والذي

ببساطة يقيس الدرجة التي يحدث بها التكبير للإجهاد الخارجي في مقدمة الشق:

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \left( \frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2} \quad (2)$$

تركيز وتكبير الإجهاد لا يقتصر فقط على العيوب المجهرية ويمكن إن يحدث في:

- المناطق الداخلية المتقطعة المرئية (مثل الشوائب inclusion والتجاويف voids).

- الأركان الحادة sharp corner.
- الخدوش والثلثات في سطح القطعة scratches and notches.
- الإجهاد الحرج المطلوب لنمو الشق في المواد القصفية:

### Critical stress for crack propagation in a brittle materials

تأثير روافع الإجهاد يكون كبيرا في المواد القصفية عن المواد المطيلة، لأنه في المواد المطيلة ينتج تشوه لدن عندما تتجاوز قيمة الإجهاد الأقصى في مقدمة الشق  $\sigma_m$  قيمة متانة الخضوع. هذا يقود لتوزيع أكثر انتظاما للإجهاد في المناطق المجاورة لرافعة الإجهاد ولنشوء معامل تركيز إجهاد أقصى يكون اقل من القيمة النظرية  $K_t$ . في المواد القصفية لا يحدث أي خضوع ولا إعادة توزيع للإجهاد حول رافعة الإجهاد لذلك تنتج القيمة النظرية لمعامل تركيز الإجهاد  $K_t$ .

باستخدام قواعد ميكانيكا الكسر Principles of fracture mechanics يمكن وصف الإجهاد الحرج Critical stress المطلوب لنمو الشق في المواد القصفية  $\sigma_c$  بالمعادلة:

$$\sigma_c = \left( \frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (3)$$

حيث أن:

E: معامل المرونة. Modulus of elasticity

$\gamma_s$ : طاقة السطح النوعية. Specific surface energy

a: طول الشق السطحي أو نصف طول الشق الداخلي. The length of a

surface crack, or half of the length of internal crack

كل المواد القصفية تحتوي على عيوب صغيرة لها أشكال وأحجام واتجاهات مختلفة وعندما تتجاوز قيمة إجهاد الشد في مقدمة احد هذه العيوب قيمة الإجهاد الأقصى  $\sigma_c$  يتكون الشق ثم ينمو تلقائيا محدثا الكسر.

## EXAMPLE PROBLEM

### Maximum Flaw Length Computation

A relatively large plate of a glass is subjected to a tensile stress of 40 MPa. If the specific surface energy and modulus of elasticity for this glass are 0.3 J/m<sup>2</sup> and 69 GPa, respectively, determine the maximum length of a surface flaw that is possible without fracture.

### Solution

To solve this problem it is necessary to employ Equation 8.3. Rearrangement of this expression such that  $a$  is the dependent variable, and realizing that  $\sigma = 40$  MPa,  $\gamma_s = 0.3$  J/m<sup>2</sup>, and  $E = 69$  GPa, leads to

$$\begin{aligned} a &= \frac{2E\gamma_s}{\pi\sigma^2} \\ &= \frac{(2)(69 \times 10^9 \text{ N/m}^2)(0.3 \text{ N/m})}{\pi(40 \times 10^6 \text{ N/m}^2)^2} \\ &= 8.2 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.0082 \text{ mm} = 8.2 \mu\text{m} \end{aligned}$$

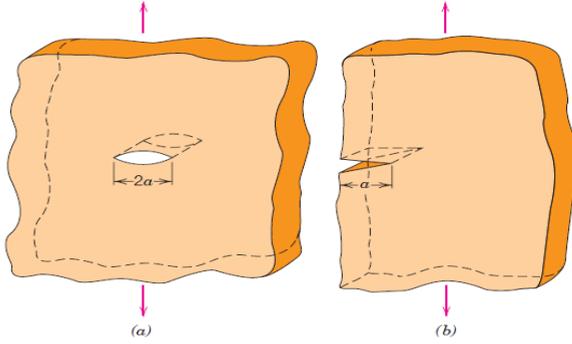
### قساوة (متانة) الكسر : Fracture toughness

باستخدام قواعد ميكانيكا الكسر يمكن حساب قساوة الكسر  $K_C$  والتي تعتمد على الإجهاد الحرج المطلوب لنمو الشق في المواد القصفيه  $\sigma_c$  و طول الشق  $a$  من المعادلة:

$$K_c = Y\sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

قساوة (متانة) الكسر  $K_C$  عبارة عن إحدى الخواص الميكانيكية **mechanical property** تقيس مقاومة المادة للكسر القصفي عند وجود شق ولها وحدات قياس استثنائية هي  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  أو  $\text{psi}\sqrt{\text{in}}$ .

$Y$  دالة (معامل) ليس لها تمييز **dimensionless parameter or function** تعتمد على حجم وشكل كل من العينة والشق بالإضافة لطريقة تسليط الحمل. عينة مستوية تحتوي على شقوق طولها اقل بكثير من عرض العينة قيمة الدالة  $Y$  تقريبا تساوي واحد، مثال لذلك في الشكل (2 a) الشريحة لها عرض لانهائي و بها شق نافذ خلال المقطع  $Y=1.0$  في حين أنه في الشكل (2 b) الشريحة لها عرض شبه لانهائي وتحتوي على شق في الحافة قيمة  $Y \approx 1.1$ .



**Figure 2** Schematic representations of (a) an interior crack in a plate of infinite width and (b) an edge crack in a plate of semi-infinite width.

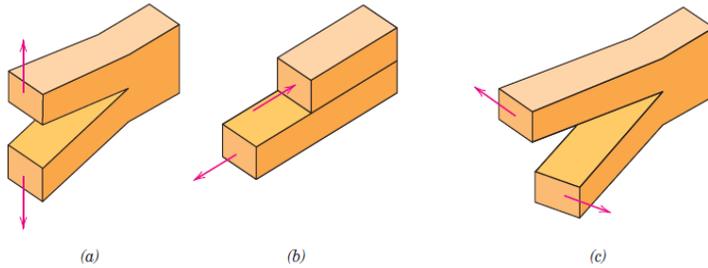
الشكل (a2) الشريحة لها عرض لانهائي وبها شق نافذ خلال المقطع (b) الشريحة لها عرض شبه لانهائي وتحتوي على شق في الحافة.

### قساوة (متانة) الكسر للانفعال المستوي: **Plane strain fracture toughness**

للعينات الرفيعة نسبيا قيمة قساوة الكسر  $K_{IC}$  تعتمد على سمك العينة في حين انه إذا كان سمك العينة اكبر بكثير من أبعاد الشق قيمة  $K_{IC}$  تصبح لا تعتمد على السمك وتحت هذه الظروف توجد حالة الانفعال المستوي **plane strain**.

حالة الانفعال المستوي **plane strain** يقصد بها عندما يعمل الحمل على الشق بالطريقة الموضحة بالشكل (a3) ولا تكون هناك مركبة انفعال عمودية على الأوجه الأمامية والخلفية ( **mode I, opening or tensile mode** ) وهي الحالة الأكثر شيوعا.

**Figure 3** The three modes of crack surface displacement. (a) Mode I, opening or tensile mode; (b) mode II, sliding mode; and (c) mode III, tearing mode.



### الشكل (3) الهيئات الثلاثة لإزاحة سطح الشق

قيمة قساوة الكسر في حالة الانفعال المستوي للعينات السمكية تعرف بقساوة (متانة) الكسر للانفعال المستوي ( $K_{IC}$ ) **plane strain fracture toughness** وتعطى بالعلاقة:

$$K_{IC} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (5)$$

للمواد القصفي التي لا يوجد فيها تشوه لدن في مقدمة الكسر قيمة  $K_{1C}$  تكون منخفضة وتعرض إلى فشل كارثي. من ناحية أخرى قيمة  $K_{1C}$  نسبيا تكون كبيرة في المواد المطيلة ، ميكانيكا الكسر تكون مفيدة للتنبؤ بالفشل الكارثي للمواد التي لها مطيليه متوسطة . الجدول (١) يوضح قيمة  $K_{1C}$  لعدد من المواد المختلفة. قساوة الكسر للانفعال المستوي  $K_{1C}$  خاصية ميكانيكية أساسية للمواد وتعتمد على مجموعة من العوامل أهمها:

• درجة الحرارة. temperature

• معدل الانفعال strain rate

• البنية المجهرية microstructure

قيمة  $K_{1C}$  تتناقص بزيادة معدل الانفعال وانخفاض درجة الحرارة. التحسين في متانة الخضوع المصنوع بمحلول صلب solid solution أو شتيت إضافات additions أو أصلاد انفعالي strain hardening ينتج انخفاض مناظر في قيمة  $K_{1C}$ . وقيمة  $K_{1C}$  تزيد بنقصان حجم الحبيبات إذا كانت المحتويات والمتغيرات الأخرى في البنية المجهرية ثابتة. لقياس  $K_{1C}$  تستخدم تقنيات اختبار مختلفة ومتعددة .

**Table 17.1 Room-Temperature Yield Strength and Plane Strain Fracture Toughness Data for Selected Engineering Materials**

Material	Yield Strength		$K_{Ic}$	
	MPa	ksi	MPa $\sqrt{m}$	ksi $\sqrt{in.}$
<b>Metals</b>				
Aluminum alloy <sup>a</sup> (7075-T651)	495	72	24	22
Aluminum alloy <sup>a</sup> (2024-T3)	345	50	44	40
Titanium alloy <sup>a</sup> (Ti-6Al-4V)	910	132	55	50
Alloy steel <sup>a</sup> (4340 tempered @ 260°C)	1640	238	50.0	45.8
Alloy steel <sup>a</sup> (4340 tempered @ 425°C)	1420	206	87.4	80.0
<b>Ceramics</b>				
Concrete	—	—	0.2–1.4	0.18–1.27
Soda-lime glass	—	—	0.7–0.8	0.64–0.73
Aluminum oxide	—	—	2.7–5.0	2.5–4.6
<b>Polymers</b>				
Polystyrene (PS)	25.0–69.0	3.63–10.0	0.7–1.1	0.64–1.0
Poly(methyl methacrylate) (PMMA)	53.8–73.1	7.8–10.6	0.7–1.6	0.64–1.5
Polycarbonate (PC)	62.1	9.0	2.2	2.0

## Design using fracture mechanics : ميكانيكا الكسر :

طبقا للمعادلتين (4) و(5) هنالك ثلاث متغيرات لا بد من أن تأخذ في الاعتبار بالنسبة لاحتمال الكسر في جزء هندسي:

- متانة الكسر  $K_{IC}$  أو متانة الكسر للانفعال المستوي  $K_{IC}$  (خواص المادة).
  - الإجهاد المسلط  $(\sigma)$  .Impose stress
  - مقاس العيب  $(a)$  .Flaw size
- (ذلك بافتراض أن قيمة  $Y$  تم تحديدها)

عند تصميم جزء أولا لا بد من تقرير أي من هذه المتغيرات تتقيد بالتطبيق و أي منها تخضع للتحكم في التصميم. مثال اختيار المادة المناسبة (بالتالي قيمة  $K_{IC}$  أو  $K_{IC}$ ) دائما يقيد ببعض العوامل مثل الكثافة (للتطبيقات ثقيلة الوزن) وخصائص التآكل للبيئة. أيضا مقاس العيب المسموح به يمكن أن يقاس أو يمكن أن يعين في حالة عدم وجود تقنية لاكتشاف العيب.

بمعرفة أي اثنين من المتغيرات السابقة فان الثالثة يمكن حسابها. مثال لذلك بافتراض أن  $K_{IC}$  وقيمة  $a$  تم تعيينهما باستخدام قيود التطبيق فان إجهاد التصميم (الإجهاد الحرج)  $\sigma_c$  يمكن حسابه بالمعادلة:

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{Y\sqrt{\pi a}} \quad (6)$$

إذا كان مستوى الإجهاد  $\sigma$  و قساوة الكسر للانفعال المستوي  $K_{IC}$  ثابتان نسبة لحالة التصميم فان أقصى مقاس عيب مسموح به يمكن حسابه بالمعادلة:

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma Y} \right)^2 \quad (7)$$

## العيوب و الاختبارات اللائتلافية: (NDT) Nondestructive test

الجدول (17.2) يوضح مجموعة الاختبارات اللائتلافية **nondestructive test** (NDT) المستخدمة لاكتشاف وقياس كل من العيوب الداخلية والسطحية. وكما يدل اسمها هذه التقنيات لا تدمر البنية أو المادة تحت الاختبار. بعض هذه الاختبارات تستخدم لأجزاء هندسية أثناء استخدامها لاكتشاف العيوب التي تؤدي للفشل المبكر، بالإضافة لذلك يمكن أن تستخدم كأداة ضبط جودة لعمليات التصنيع. بعض هذه الاختبارات تثبت وتستخدم في المختبر وبعضها يمكن استخدامه في الحقل.

- بالميكروسكوب الالكتروني (SEM) Scanning electron microscopy
- الصبغة النفاذة Dye penetrant

- Ultrasonic الموجات فوق الصوتية
- Optical microscopy بالميكروسكوب الضوئي
- Visual inspection الفحص البصري
- Acoustic emission الانبعاث الصوتي
- Radiography (x-ray/gamma ray) التصوير بالأشعة

**Table 17.2 A List of Several Common Nondestructive Testing (NDT) Techniques**

<i>Technique</i>	<i>Defect Location</i>	<i>Defect Size Sensitivity (mm)</i>	<i>Testing Location</i>
Scanning electron microscopy (SEM)	Surface	>0.001	Laboratory
Dye penetrant	Surface	0.025–0.25	Laboratory/in-field
Ultrasonics	Subsurface	>0.050	Laboratory/in-field
Optical microscopy	Surface	0.1–0.5	Laboratory
Visual inspection	Surface	>0.1	Laboratory/in-field
Acoustic emission	Surface/subsurface	>0.1	Laboratory/in-field
Radiography (x-ray/gamma ray)	Subsurface	>2% of specimen thickness	Laboratory/in-field

واحد من أهم الأمثلة لاستخدام NDT هو في اكتشاف الشقوق **cracks** والتسريب **leaks** في جدران خطوط أنابيب البترول في المناطق البعيدة. وعادة ما يستخدم الموجات فوق صوتية **Ultrasonic** باتصال مع تقنية الروبوت **robotic** الذي يمكن أن يسافر مسافات طويلة داخل خط الأنابيب.

## الفصل الرابع فشل الكلال Fatigue failure

### مقدمة: Introduction

الكلال احد أساليب الفشل يحدث للبنية الخاضعة لاجهادات ديناميكية ومترددة (مثل الكباري والطائرات وأجزاء الماكينات)، وتحت هذه الظروف من المحتمل أن يحدث الفشل عند مستوى إجهاد اقل بكثير من متانة الشد (أو حتى متانة الخضوع) في حالة الحمل الاستاتيكي.

المصطلح كلال (التعب) يستخدم لان هذا النوع الفشل عادة ما يحدث بعد فترة طويلة من الإجهاد المتكرر **repeated stress** أو دورات الانفعال **strain cycling**.

يعد الكلال اكبر أسباب الفشل في الأجزاء المعدنية (يمثل تقريبا 90% من كل فشل المعادن)، واللدائن والمواد السيراميك (ماعدا الزجاج) أيضا تتعرض لهذا النوع من الفشل.

الفشل الكلالي ذو طبيعة قصفيه حتى في المعادن التي في العادة تكون المطيلية لان التشوه اللدن إذا صاحبه يكون قليل جدا.

الفشل الكلالي ماکرومأساوي ويحدث فجأة بدون تحذير. العملية تتم بواسطة نشوء شقوق ثم نموها وعادة سطح الكسر يكون عمودي على اتجاه الإجهاد المسلط.

### الاجهادات الدورية: Cyclic stresses

الإجهادات الكلال يمكن أن تكون محوريه **axial** (شد-ضغط) أو ثني **flexural** (انحناء **bending**) أو لي **torsional** (متلولب **twisting**). وعموما هنالك احتمال ثلاثة أشكال مختلفة للعلاقة بين الإجهاد المتردد والزمن **fluctuating stress-time**:

الاحتمال الأول: يسمى بدورة الإجهاد المعكوسة **reversed stress cycle** ويمثل بالمنحنى الجيبي المنتظم في الشكل (1) حيث أن سعة (نطاق) الإجهاد **amplitude** متماتلة حول متوسط مستوى إجهاد يساوي الصفر، مثال لذلك أن يتعاقب الإجهاد بين أقصى إجهاد شد ( $\sigma_{max}$ ) وأدنى إجهاد ضغط ( $\sigma_{min}$ ) يكونان متساويان في المقدار.

الاحتمال الثاني: يسمى بدورة الإجهاد المتكررة **repeated stress cycle** ويمثل بالمنحنى الجيبي المنتظم في الشكل (b1) حيث أن القيمتان القصوى والدنيا للإجهاد تتماثلان حول متوسط إجهاد ( $\sigma_m$ ) بعيد نسبيا من مستوى الإجهاد صفر .  
 الاحتمال الثالث: يمثل بالمنحنى في الشكل (c1) حيث أن مستوى الإجهاد يتغير عشوائيا من حيث السعة **amplitude** والتردد **frequency** .  
 كما موضح بالشكل (b1) هنالك عدد من المقاييس المستخدمة لوصف تقلب دورة الإجهاد:

**الإجهاد متوسط: (mean stress ( $\sigma_m$ ))**

هو القيمة التي يتراوح حولها نطاق الإجهاد ويحسب بمتوسط أقصى وأدنى إجهاد في الدورة.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1)$$

**مدى الإجهاد: (range of stress ( $\sigma_r$ ))**

الفرق بين أقصى قيمة للإجهاد وأدنى قيمة للإجهاد.

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2)$$

**سعة (نطاق) الإجهاد: (stress amplitude ( $\sigma_a$ ))**

نصف مدى الإجهاد.

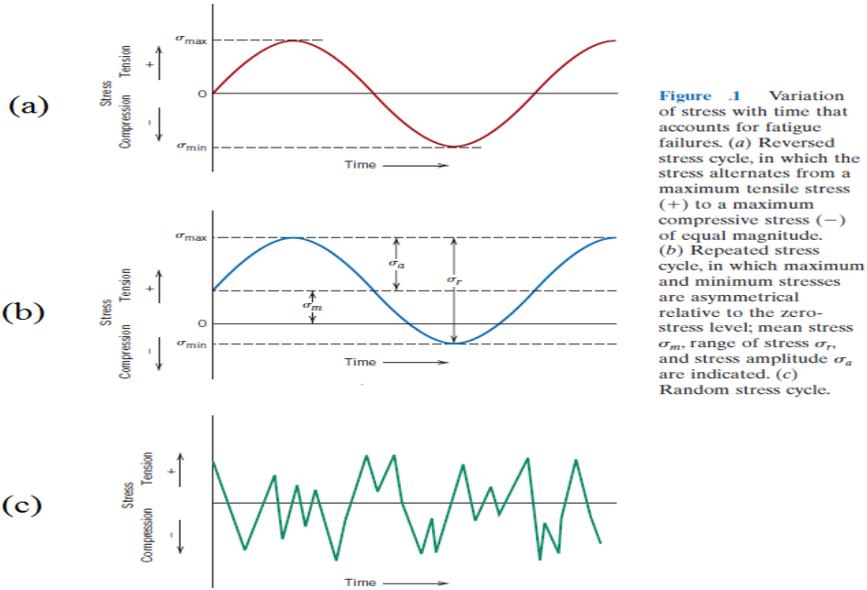
$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (3)$$

**نسبة الإجهاد: (stress ratio ( $R$ ))**

النسبة بين ادنى وأقصى إجهاد

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (4)$$

اصطلاحا إجهاد الشد يأخذ إشارة موجبة (+) وإجهاد الضغط يأخذ إشارة سالبة (-)، مثلا لدورة الإجهاد المعكوسة **reversed stress cycle** قيمة نسبة الإجهاد  $R = -1$ .



الشكل (1) تغير الإجهاد مع الزمن في حالات الفشل الكلاسي

### منحنى الكلال S-N: The S-N curve

مثل بقية الخواص الميكانيكية خواص الكلال للمواد يمكن تحديدها باختبارات محاكاة في المختبر. أجهزة الاختبار لا بد من تصميمها لتطابق بقدر الإمكان ظروف الخدمة (مستوى الإجهاد، تردد الزمن، نمط الإجهاد، etc...). الشكل (2) يوضح رسم تخطيطي لجهاز اختبار الكلال الأكثر استخداما وفيه إجهاد الضغط وإجهاد الشد يسلطان على العينة أثناء دورانها وانحناءها.

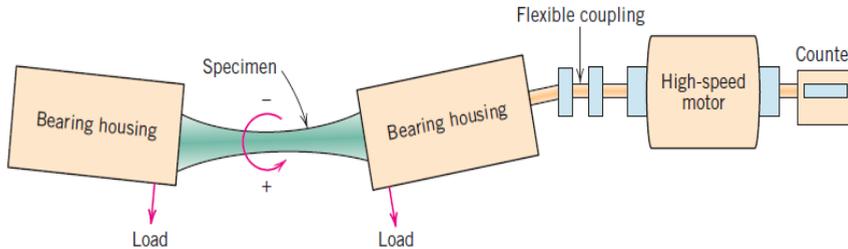


Figure 2 Schematic diagram of fatigue-testing apparatus for making rotating-bending tests.

الشكل (2) جهاز اختبار الكلال

## اختبارات الكلال:

١. تبدأ سلسلة الاختبارات بتعريض عينة لدورة إجهاد عند إجهاد أقصى ( $\sigma_{max}$ ) كبير نسبياً (عادةً ثلثي متانة الشد الاستاتيكي) وتحسب عدد الدورات حتى حدوث فشل.
٢. تكرر العملية على مجموعة من العينات الأخرى بإنقاص تدريجي لقيمة الإجهاد الأقصى.
٣. توضع البيانات في رسم بياني محوره الراسي الإجهاد  $S$  ومحوره الأفقي لوجارثم عدد الدورات حتى حدوث الفشل  $N$ . قيمة الإجهاد  $S$  عادة ما تؤخذ كسعة (نطاق) الإجهاد ( $\sigma_a$ ) stress amplitude (المعادلة 3).

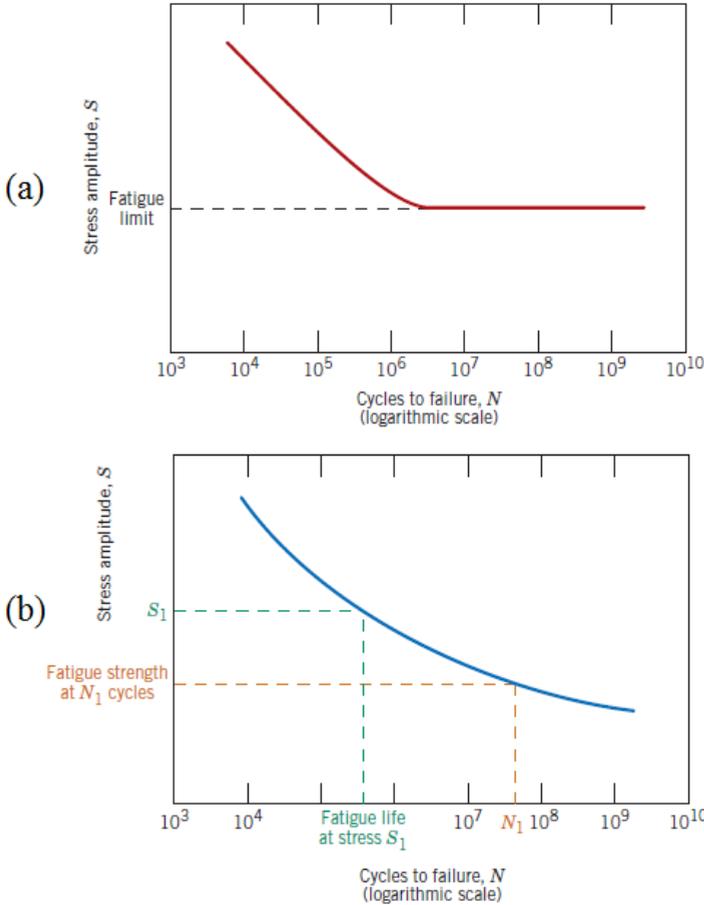


Figure 3 Stress amplitude ( $S$ ) versus logarithm of the number of cycles to fatigue failure ( $N$ ) for (a) a material that displays a fatigue limit and (b) a material that does not display a fatigue limit.

الشكل (٣) رسم بياني لسعة (نطاق) الإجهاد ( $S$ ) ولوجارثم عدد الدورات حتى حدوث الفشل ( $N$ )

الشكل (٣) يمثل نوعين مميزين من السلوك لمنحنيات S-N يمكن ملاحظتهما. بصورة عامة الرسمان البيانيان يشيران إلى انه كلما كانت قيمة الإجهاد كبيرة كلما كانت قلت عدد الدورات التي تثبتها (تبقاها) المادة حتى الفشل.

#### حد الكلال: **fatigue limit**

لبعض السبائك الحديدية وسبائك التتانيوم المنحني S-N (الشكل ٣a) يصبح أفقيا عند قيم  $N$  العالية أو عند مستوى إجهاد محدد يسمى حد الكلال **fatigue limit** وفي بعض الأحيان يسمى حد الاحتمال (البقاء) **endurance limit**. أسفل حد الكلال لا يحدث الفشل، وهو يمثل اكبر قيمة لتردد الإجهاد لا تسبب الفشل لعدد لا نهائي من الدورات.

حد الكلال لعدد من سبائك الفولاذ يتراوح بين 60% - 35% من متانة الشد.

#### متانة الكلال: **fatigue strength**

معظم السبائك الغير حديدية (مثلا الألمنيوم والنحاس والمغنسيوم) ليس لها حد كلال، والمنحني S-N لها يواصل الميلان لأسفل بزيادة قيمة  $N$  (الشكل ٣b)، لذلك يحدث الفشل الكلالي في النهاية بصرف النظر عن قيمة الإجهاد. لهذه المواد استجابة الكلال تعين كمتانة الكلال **fatigue strength** والتي تعرف بأنها مستوى الإجهاد الذي يحدث عنده الفشل لعدد معين من الدورات (مثلا 10<sup>7</sup> دورة).

#### عمر الكلال: **fatigue life**

عمر الكلال  $N_f$  **fatigue life** مقياس مهم يصف سلوك الكلال للمواد ويعرف بأنه عدد الدورات التي تسبب الفشل عند مستوى إجهاد معين (الشكل ٣b).

#### تبعثر بيانات الكلال: **fatigue data-scatter**

لسوء الحظ دائما ما يوجد هنالك تبعثر **scatter** مقدر في بيانات الكلال حيث يكون هنالك اختلاف في قياس قيمة  $N$  لعدد من العينات التي تم اختبارها عند نفس مستوى الإجهاد. وهذا الاختلاف قد يقود إلى شك كبير في التصميم عندما يأخذ في الاعتبار عمر الكلال **fatigue life** و/أو حد الكلال **fatigue limit** و/أو متانة الكلال **fatigue strength**. التبعثر يحدث كنتيجة لحساسية الكلال لعدد من متغيرات اختبار المادة والتي من الصعب التحكم فيها بدقة. وهذه المتغيرات تضم:

- تصنيع العينات **specimen fabrication**
- تجهيز السطح **surface preparation**

• ضبط العينة في الجهاز specimen alignment in apparatus

• متوسط الإجهاد mean stress

• عدد مرات تكرار الاختبار test frequency

• المتغيرات المتعلقة بخواص المادة metallurgical variables

مشكلة التبعر يتم معالجتها إحصائيا بعمل أكثر من اختبار لمستوى الإجهاد

المعين ثم رسم منحنى الكلال S-N من خلال القيمة المتوسطة لبيانات النقاط.

احتمال الفشل الكلالي: - probability of fatigue failure

تم تطوير مجموعة من التقنيات الإحصائية لتعيين عمر الكلال وحد الكلال في

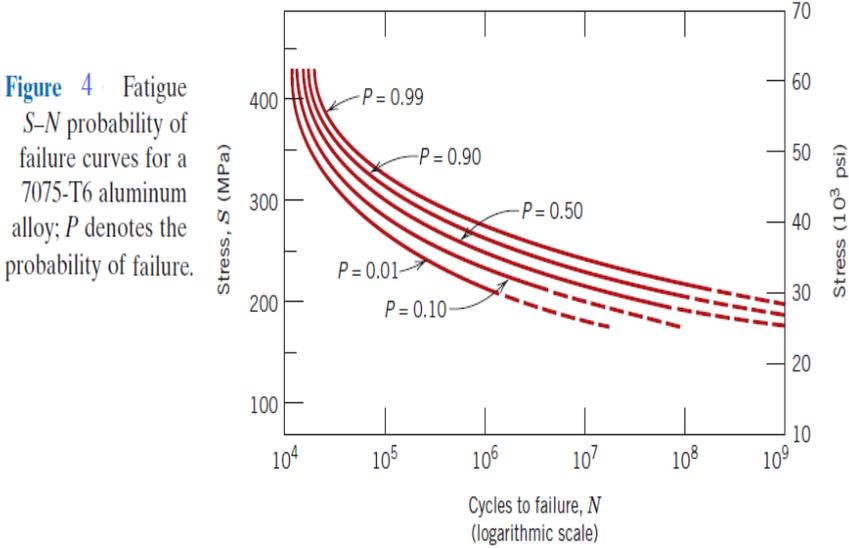
شكل احتمالات. إحدى الطرق المناسبة هي تمثيل البيانات المعالجة بسلسلة من

منحنيات الاحتمال الثابتة (عدد منها مرسوم في الشكل (٤)). قيمة  $P$  المصاحبة لكل

منحنى تمثل احتمال الفشل. مثلا عند إجهاد  $200 \text{ MPa}$  ( $30,000 \text{ psi}$ ) نتوقع  $1\%$

من العينات تفشل عند حوالي  $10^6$  دورة و  $50\%$  تفشل عند حوالي  $2 \times 10^7$  دورة

وهكذا.



الشكل (٤) منحنيات الاحتمال الثابتة

سلوك الكلال: fatigue Behaviors

سلوك الكلال الممثل في الشكلين ( $a_3$  &  $b_3$ ) يمكن تصنيفه إلى مجالين:

المجال الأول: مصاحب للحمل العالي نسبيا ولا ينتج انفعال مرن elastic

deformation فقط لكن انفعال لدن plastic deformation أيضا أثناء أي دورة

بالتالي عمر الكلال قصير نسبيا. هذا المجال يسمى كلال الدورات المنخفضة -low cycle fatigue ويحدث عند اقل من  $10^4$  إلى  $10^5$  دورة تقريبا.

المجال الثاني: مصاحب لمستويات الإجهاد المنخفضة والتي يكون فيها التشوه مرنا كليا ينتج عمر كلال أطول، وهذا يسمى كلال الدورات العالية high-cycle fatigue نسبة للعدد الكبير من الدورات المطلوبة لحدوث الفشل. كلال الدورات العالية يكون مصاحب لعمر كلال اكبر من  $10^4$  إلى  $10^5$  دورة تقريبا.

### نشوء الشق ونموه: Crack initiation and propagation

عملية الفشل الكلاي تتميز بثلاث خطوات بارزات:

(١) نشوء الشق crack initiation، والتي فيها تتكون شقوق صغيرة عند

بعض النقاط ذات التركيز العالي للإجهاد.

(٢) نمو الشق crack propagation، والتي خلالها يتقدم الشق تزايديا مع

كل دورة إجهاد.

(٣) الفشل النهائي final failure، والذي يحدث سريع جدا مجرد أن يصل

تقدم الشق الطول الحرج.

الشقوق المصاحبة للفشل الكلاي دائما تقريبا ما تنشأ في سطح الجزء عند نقاط تركيز الإجهاد والتي تتضمن الخدوش في السطح surface scratches والالتفافات الحادة sharp fillets ومجاري الخواير keyways والقلاووظ threads و البروز (الانبعاث) dents. بالإضافة لذلك التحميل الدوري ينتج فجوات discontinuities مجهرية في السطح حيث تحدث انزلاقات slips صغيرة في كل مرة يتغير فيها اتجاه الإجهاد ولا ترجع هذه الانخلاعات dislocations إلى مكانها في كل مرة كليا، وهذا يؤدي إلى حدوث بروز في جزء من السطح ودخول في جزء آخر منه، وتعمل أماكن الدخول كروافع إجهاد وبالتالي مواقع لنشوء الشق.

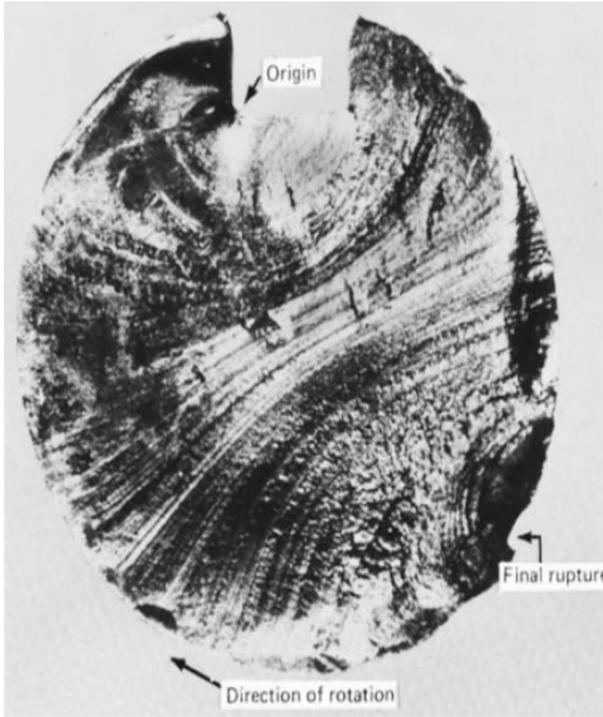
منطقة سطح الكسر المشكلة أثناء خطوة نمو الشق تتميز بنوعين من العلامات

تسميان:

• علامات الشاطئ الرملي beachmarks

• والحزوز (الثلمات) striations،

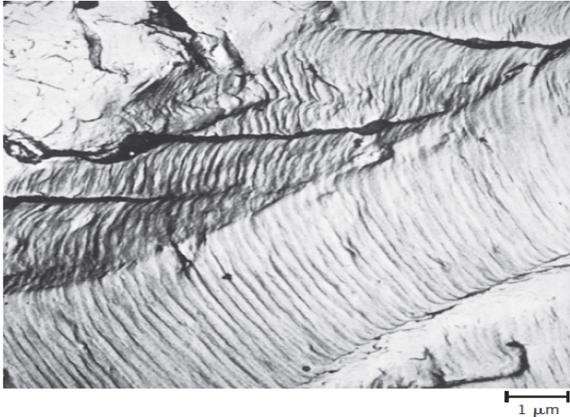
وهاتين الهيئتين تشيران إلى موقع مقدمة الشق عند نقطة من الزمن وتظهر كسلسلة تلال شبه دائرية متحدة المركز تتمدد مبتعدة من مكان (أماكن) نشوء الشق.



**Figure 5** Fracture surface of a rotating steel shaft that experienced fatigue failure. Beachmark ridges are visible in the photograph.

الشكل (٥) علامات الشاطئ الرملي beachmarks

علامات الشاطئ الرملي (تسمى أيضا علامات الدلو المحاري clamshell marks) كما ترى بالعين المجردة موضحة بالشكل (٥). وتوجد هذه العلامات في الأجزاء التي تعرضت لتقطيع في التشغيل interruptions أثناء مرحلة نمو الشق (مثلا الماكينة عملت فقط خلال ساعات الوردية العادية)، وكل حزمة علامات تمثل فترة من الزمن حدث فيها نمو للشق.



**Figure 6** Transmission electron fractograph showing fatigue striations in aluminum.

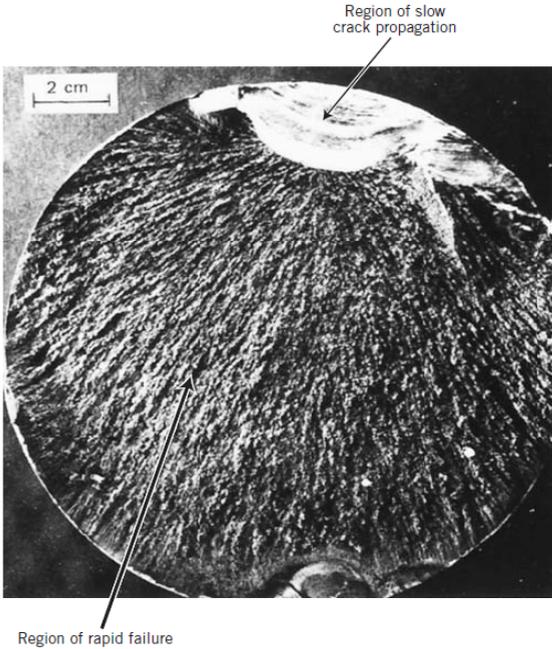
الشكل (٦) حزوز (ثلمات) الكلال fatigue striations

من ناحية أخرى فان حزوز (ثلمات) الكلال **fatigue striations** تكون مجهرية الحجم (صغيره جدا) كما يوضحها الشكل (٦). والحز (الثلمة) الواحد يمثل المسافة التي تقطعها مقدمة الشق خلال دورة تحميل واحدة، وعرض الحز يعتمد على (يزيد) على زيادة مدى الإجهاد **stress range**.

إلى هذه النقطة يجب التأكيد بأنه بالرغم من أن كل من علامات الشاطئ الرملي والحزوز هيئتان لسطح الكسر الكلالي لهما نفس المظهر، بالرغم من ذلك مختلفتان في النشوء والحجم (قد يكون هنالك آلاف الحزوز في علامة الشاطئ الرملي الواحدة).

دائما سبب الفشل يستنتج بعد اختبار وفحص سطح الفشل، ووجود علامات الشاطئ الرملي و/أو الحزوز على سطح الكسر يؤكد أن سبب الفشل هو الكلال. مع ذلك غياب احدهما أو الاثنان معا لا يبعد الكلال كسبب للفشل.

تعليق أخير يتعلق بأسطح الفشل الكلالي: علامات الشاطئ الرملي والحزوز لا تظهران في المواضع التي يحدث فيها الفشل السريع **rapid failure** والذي قد يكون مطيلي (به تشوه لدن) أو قصفي (ليس به تشوه لدن). منطقة الفشل يمكن ملاحظتها في الشكل (٧).



**Figure 7** Fatigue failure surface. A crack formed at the top edge. The smooth region also near the top corresponds to the area over which the crack propagated slowly. Rapid failure occurred over the area having a dull and fibrous texture (the largest area).

الشكل (٧) مظهر الفشل السريع **rapid failure**

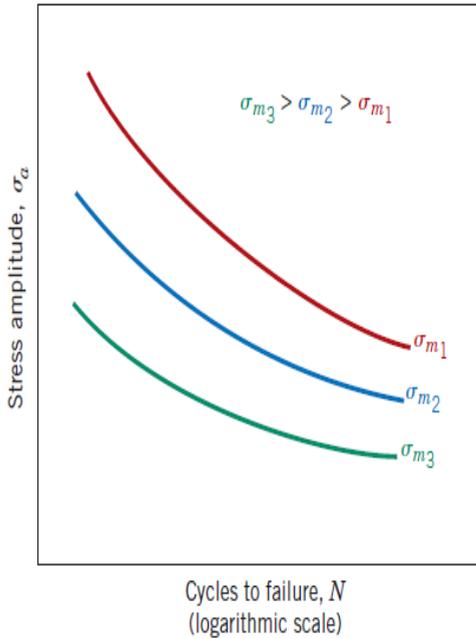
### العوامل التي تؤثر على عمر الكلال: Factors that affecting fatigue life

كما ذكر سابقا فان سلوك الكلال للمواد الهندسية حساس جدا لعدد من المتغيرات. بعض هذه العوامل تتضمن مستوى الإجهاد المتوسط **mean stress** و التصميم الهندسي للشكل **geometrical design** ومظهر السطح **surface effects** ومتغيرات خواص المادة **metallurgical variables** والبيئة المحيطة **environment**.

هذا الجزء مكرس لمناقشة هذه العوامل بالإضافة للتدابير التي يمكن اتخاذها لتحسين مقاومة الكلال **fatigue resistance** لمكونات البنية الهندسية.

#### الإجهاد المتوسط: **mean stress**

اعتماد عمر الكلال على نطاق (سعة) الإجهاد تمثل في منحنى الكلال **S-N**. هذه البيانات أخذت لإجهاد متوسط ثابت  $\sigma_m$  غالبا ما يكون لحالة دورة الإجهاد المعكوسة ( $\sigma_m = 0$ ). الإجهاد المتوسط أيضا يؤثر على عمر الكلال. هذا التأثير يوضحه الشكل (18.8) الذي يمثل سلسلة من منحنيات الكلال **S-N** كل منها عند لإجهاد متوسط  $\sigma_m$  مختلف. كما يلاحظ زيادة مستوى الإجهاد المتوسط تقود لنقصان عمر الكلال.



**Figure 8** · Demonstration of the influence of mean stress  $\sigma_m$  on **S-N** fatigue behavior.

الشكل (٨) تأثير الإجهاد المتوسط على عمر الكلال

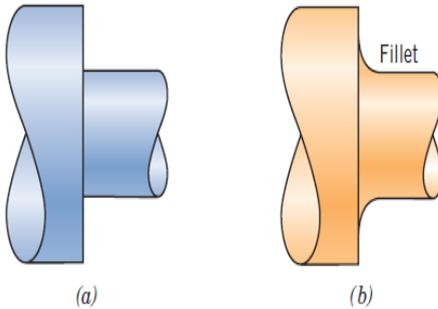
### مظهر السطح: surface effects

لمعظم حالات التحميل الإجهاد الأقصى للجزء أو البنية يحدث عند السطح، بالتالي معظم الشقوق التي تقود للفشل الكلاسيكي تبدأ في السطح خاصة في أماكن تركيز الإجهاد. لذلك يلاحظ أن عمر الكلال على وجه الخصوص حساس لحالة وهيئة سطح الجزء.

عوامل متعددة تؤثر على مقاومة الكلال والتدبير المناسب لأي منها يقود لتحسين مقاومة الكلال. هذا يتضمن مؤشرات التصميم والمعالجات السطحية المختلفة.

### عوامل التصميم: design factors

تصميم الجزء له تأثير كبير على صفات الكلال، فأي حز أو فجوة في الشكل يمكن أن تعمل كرافعة إجهاد **stress raiser** وموقع لنشوء شقوق الكلال. هيئات التصميم المرفوضة تتضمن الأخاديد والثقوب ومجاري الخواير والقلاووظ. كلما كانت الفجوة حادة (نصف قطر الانحناء صغير) كلما زاد قابليتها لتركيز الإجهاد. احتمال الفشل الكلاسيكي يقل بتفادي عدم الانتظام في البنية بقدر الإمكان أو بعمل تعديل في التصميم يتم فيه التخلص من التغير المفاجئ الذي يقود للأركان الحادة. مثلاً عمل التفاف مستدير **rounded fillet** بنصف قطر انحناء كبير عند النقطة التي يكون فيها تغير في قطر عمود الدوران (الشكل ٩).



**Figure 9** Demonstration of how design can reduce stress amplification. (a) Poor design: sharp corner. (b) Good design: fatigue lifetime improved by incorporating rounded fillet into a rotating shaft at the point where there is a change in diameter.

### الشكل (٩) تأثير التصميم على عمر الكلال

### المعالجات السطحية: surface treatments

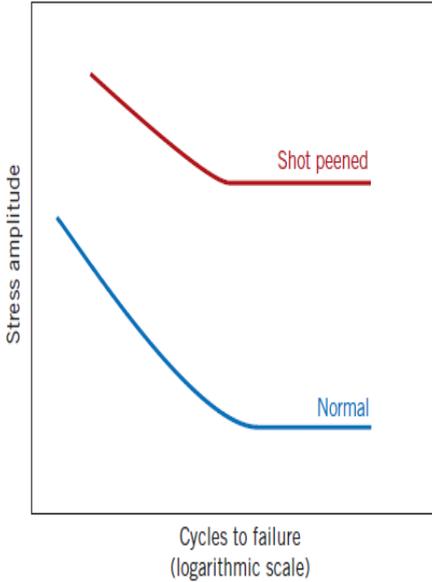
### الصقل polishing:

خلال عمليات التشغيل ونتيجة لحركة أداة القطع تظهر على سطح الشغلة خدوش وأخاديد صغيرة تؤدي إلى الحد من عمر الكلال. ومن الملاحظ أن تحسين التشطيب السطحي بالصقل **polishing** يزيد عمر الكلال زيادة مؤثرة.

## الطرق بالطلقات :shot peening

واحدة من أكثر الطرق المؤثرة على زيادة عمر الكلال هي تعريض الطبقات الخارجية الرفيعة لاجهادات ضغط متبقية **residual compressive stresses** . بالتالي إجهاد الشد السطحي للمصادر الخارجية يلطف جزئيا وتنقص قيمته بإجهاد الضغط المتبقي. يكون التأثير النهائي هو تقليل احتمال تكون الشقوق بسبب ذلك تقليل الفشل الكلال.

اجهادات الضغط المتبقية تدخل للسطح ميكانيكيا للمعادن الطرية بعمل تشوه لدن موضعي لمناطق معينة في السطح الخارجي، وتجاريا تتم بطريقة تسمى الطرق بالطلقات **shot peening** وفيها كرات صغير قاسية (الطلقات) لها قطر يتراوح بين **0.1 to 1.0mm** يتم إسقاطها بسرعات عالية على السطح المراد معالجته والنتيجة تكون تشوه يحدث اجهادات ضغط لعمق بين ربع إلى نصف قطر الطلقة **shot**. تأثير عملية الطرق بالطلقات على سلوك الكلال للفولاذ موضح بالشكل (١٠).



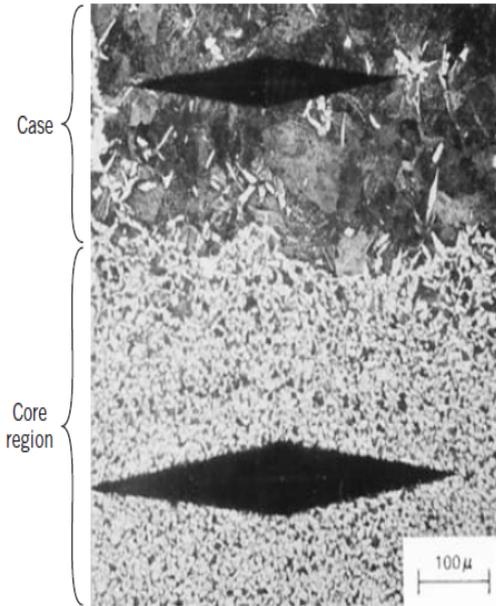
**Figure 10** Schematic *S-N* fatigue curves for normal and shot-peened steel.

## الشكل (١٠) تأثير عملية الطرق بالطلقات على سلوك الكلال

### التقسية السطحية :case hardening

التقسية السطحية تقنية يتم بها زيادة كل من صلادة السطح وعمر الكلال لسبائك الفولاذ وتتم بعملية الكربنة أو عملية النتردة حيث يتم تعريض الجزء لجو غني بالكربون أو النتروجين عند درجات حرارة مرتفعة. يتغلغل الكربون أو

النيتروجين للطبقة الخارجية للسطح بالانتشار الذري **atomic diffusion** ليصبح السطح ولعمق حوالي 1mm أكثر صلادة من القلب الداخلي للمنتج. التحسين في خواص الكلال تنتج من زيادة الصلادة في السطح بالإضافة إلى تكوين اجهادات الضغط المتبقية المصاحبة لعمليات الكربنة التبردة. الزيادة في صلادة السطح موضحة بالشكل (١١) حيث الشكلان الماسيات المظلمان يمثلان الأثر لجهاز الصلادة ويلاحظ أن الأثر الأعلى الواقع في الطبقة الكربنة اصغر من الواقع القلب.



**Figure 11** Photomicrograph showing both core (bottom) and carburized outer case (top) regions of a case-hardened steel. The case is harder, as attested by the smaller microhardness indentation. 100X.

الشكل (١١) تأثير عملية التقسية السطحية على سلوك الكلال

#### تأثيرات البيئة: Environmental effects

عوامل البيئة أيضا تؤثر على سلوك الكلال للمواد الهندسية، وفي هذا الجزء تتم مناقشة مختصره لنوعين من الأشكال البيئية للفشل الكلاي هما الكلال الحراري **thermal fatigue** و كلال التآكل **corrosion fatigue**.

#### **الكلال الحراري thermal fatigue:**

عادة ما يحدث الكلال الحراري عند درجات الحرارة المرتفعة بواسطة التذبذب في الإجهادات الحرارية **thermal stresses** ولا تكون هناك حوجة لوجود الإجهادات الميكانيكية من مصدر خارجي. مصدر هذه الإجهادات الحرارية هو الكبت (التقييد) للتمدد و/أو الانكماش الذي عادة ما يحدث للجزء نتيجة للتغير في درجة الحرارة.

مقدار الإجهاد الحراري الناتج من التغير في درجة الحرارة  $\Delta T$  يعتمد على:

- معامل التمدد الحراري للمادة  $\alpha_l$  coefficient of thermal expansion
- معامل المرونة E. modulus of elasticity

$$\sigma = \alpha_l E \Delta T \quad (5)$$

الإجهادات الحرارية لا ترتفع إذا كان الكبت (التقييد) الميكانيكي غائبا، لذلك واحد من أوضح الطرق لمنع هذا النوع من الكلال هو التخلص من مصدر الكبت (التقييد) أو تقليله بقدر الإمكان بذلك يسمح بتغيير غير مقيد في المقاسات بتغيير درجة الحرارة.

(الكبت الميكانيكي ينتج من اللحام، البرشام، الربط بالمسامير...)

أيضا يمكن منع أو التقليل من الكلال الحراري باختيار مواد ذات خواص

فيزيائية مناسبة  $\alpha_l$ .

#### كلال التآكل :corrosion fatigue

البيئات الأكلة **corrosive environments** لها تأثير مؤذ وتنتج أعمار كلال قصيرة. حتى الجو المحيط الطبيعي يؤثر على سلوك الكلال لبعض المواد.

ال فشل الذي يحدث بفعل الإجهاد الدوري المتزامن مع الهجوم الكيميائي يسمى بكلال التآكل. نتيجة للتفاعل الكيميائي بين المادة والبيئة تنشأ حفر صغيرة يمكن أن تعمل كنقاط لتمركز الإجهاد بالتالي مواقع لنواة الشق. بالإضافة لذلك معدل نمو الشق يزيد كنتيجة للبيئة الأكلة.

طبيعة دورات الإجهاد تؤثر على سلوك الكلال، مثلا تكرار تخفيض تطبيق الحمل يقود لأن يكون الشق مفتوح لفترات طويلة ومعرض للبيئة مما يقلل من عمر الكلال. هنالك عدد من الطرق لمنع والوقاية من كلال التآكل (تناقش بالتفصيل في محاضرة فشل التآكل) منها:

- عمل طبقات واقية للسطح. **Protective surface coatings**
- اختيار مادة أكثر مقاومة للتآكل. **Select a more corrosion-resistant material**
- اتخاذ إجراء لتقليل احتمال الفشل الكلالي مثلا بتقليل مستوى إجهاد الشد المسلط بعمل اجهادات ضغط متبقية في سطح الجزء (كما مضح سابقا).

# الفصل الخامس

## فشل الزحف

### Creep failure

#### مقدمة: Introduction

المواد الهندسية في أحوال كثيرة توضع في الخدمة عند درجات حرارة مرتفعة وتعرض لاجهادات ميكانيكية ثابتة (مثل التوربينات الدوارة التي تلاقي اجهادات طرد مركزي في المحركات النفاثة والمولدات البخارية ، وخطوط أنابيب البخار ذات الضغط العالي).

التشوه تحت هذه الظروف يسمى الزحف **creep** ويمكن تعريفه بالتشوه الدائم **permanent deformation** للمواد والذي يعتمد على الزمن **time-dependent** عندما تتعرض لإجهاد أو حمل ثابت **constant load or stress** عند درجة حرارة مرتفعة **elevated temperature** .

الزحف عادة ظاهرة غير مرغوبة وكثيرا ما تعد عامل يحد من عمر الجزء. يظهر الزحف في كل أنواع المواد الهندسية، وللمعادن تصبح مهم فقط عند درجات حرارة تقريبا اكبر من  $0.4T_m$  ( $T_m$  = درجة حرارة الانصهار المطلقة).

#### آليات (طرق) سلوك الزحف: Creep behavior mechanisms

من المعروف أن الزحف تشوه مستمر يحدث إذا تعرضت المادة الهندسية إلى تسليط إجهاد أو حمل ثابت تحت درجة حرارة ثابتة ويحدث التشوه الزحفي حتى إذا كان الإجهاد اقل من إجهاد الخضوع.

لتفسير سلوك الزحف (كيف يحدث الزحف) تم اقتراح مجموعة من الآليات (الطرق) النظرية. وهما (حسب الإجهاد ودرجة الحرارة) طريقتان هما:

١. الزحف عن طرق حركة الانخلاعات. **Dislocation movement creep**

٢. الزحف عن طريق الانتشار. **Diffusion creep**

الزحف عن طرق حركة الانخلاعات: **Dislocation movement creep**

حركة الانخلاعات تلعب دورا كبيرا ومهما أثناء التشوه الزحفي ويتم التشوه الزحفي عن طريق حركة الانخلاعات عند درجات حرارة اعلي من  $0.4T_m$  في ثلاث مراحل:

١. مرحلة تكوين الانخلاعات.

٢. مرحلة حركة الانخلاعات.

٣. مرحلة إعادة تنظيم الانخلاعات أثناء عملية زوال الانفعالات.

عند بداية الزحف ونتيجة لتسليط الإجهاد تتحرك الانخلاعات بسرعة كبيرة طالما أن المعدن خالي من اصلااد الانفعال **strain hardening**. هذه السرعة في حركة الانخلاعات تؤدي إلى حدوث تشوه أو انفعال بصورة كبيرة ولكن بعد فترة قصيرة تتراكم هذه الانخلاعات خلف حواجز (مثل الحدود الحبيبية) تحول دون حركتها مما يؤدي إلى زيادة اصلااد الانفعال داخل المعدن وبالتالي يقل معدل الانفعال تدريجياً. يستمر تراكم الانخلاعات خلف هذه الحواجز حتى يكون الإجهاد الداخلي الناتج من تراكمها كافي لمنع تكون وتحريك انخلاعات جديدة من المنبع.

نتيجة للطاقة التنشيطية للزحف  $Q_c$  الناتجة عن درجة الحرارة تتمكن الانخلاعات القريبة من مقدمة الحاجز من التسلق إلى سطح انزلاق آخر أو جديد تنحدر عليه، كذلك يمكن أن يحدث فناء أو زوال لانخلاع إذا قابل انخلاع آخر ذو علامة أو إشارة مضادة لإشارته. وبالتالي يقل تراكم الانخلاعات خلف الحاجز ومن ثم اصلااد الانفعال مما يسمح بحركة جديدة للانخلاعات من المنبع ومواصلة حدوث التشوه (الانفعال) الزحفي.

بعد فترة طويلة من الزمن يحدث تعادل بين عملية اصلااد الانفعال **strain hardening** الناتج عن تراكم الانخلاعات وبين عملية الاستعادة **recovery** (التي تحدث التلين) والناتجة عن زوال الانفعالات باجتياز الانخلاعات للحواجز في هذه المرحلة يتواصل التشوه بصورة منتظمة ومستقرة .

باستمرار تتعرض المادة للتشوه يحدث فيها تخرص عند منطقة من طول العينة، يعمل الإجهاد بصورة كبيرة في منطقة التخرص مما يؤدي لزيادة معدل الزحف وبالتالي زيادة التخرص ونتيجة لهذا التشوه المستمر في منطقة التخرص يرتفع اصلااد الانفعال بصورة كبيرة ويؤدي إلى حدوث شق صغير في منطقة الحدود الحبيبية أو داخل حبيبات المادة. تتراكم الإجهادات في مقدمة الشق أو الشقوق مما يؤدي إلى نموها حتى تصل إلى الطول الحرج وبالتالي تقود إلى الفشل والتمزق.

### الزحف عن طريق الانتشار: **Diffusion creep**

عموما طريقة الزحف بالانتشار من الطرق المهيمنة لإحداث التشوه عندما تكون درجة الحرارة حوالي 80% من درجة حرارة انصهار المادة ( $0.8T_m$ ).

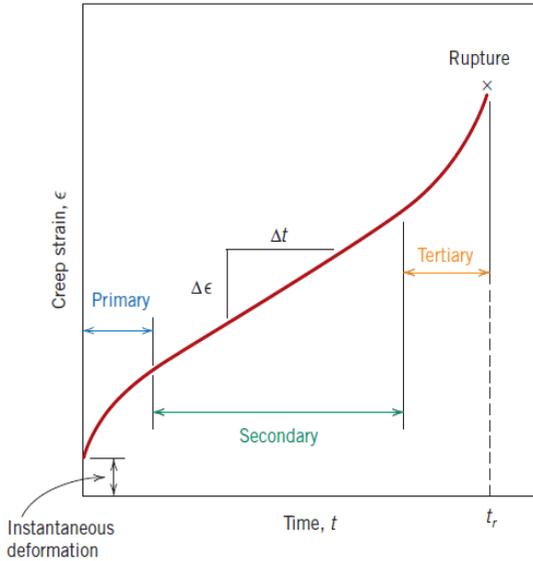
يحدث التشوه الزحفي عن طريق الانتشار نتيجة لتبادل الخلوات والفجوات بين المنابع والمصببات تحت تأثير درجات الحرارة العالية و عندما يكون الإجهاد قليل وغير كافي لحركة الانخلاعات..

في هذه الطريقة يحدث التشوه اللدن نتيجة لحركة الذرات نسبة لوجود عيوب نقطية (خلوات أو فجوات) في البنية البلورية أو في الحدود الحبيبية وتعتبر الحدود الحبيبية من أهم مصادر الخلوات وكذلك من أهم مصباتها طالما أن توزيع وتركيز الفجوات ليس متساوي في الشبكة البلورية للمادة فان حركة الفجوات واختفائها يتم تحت تأثير طاقة زحف تنشيطية مساوية لطاقة الانتشار ذري.

### Creep behavior tests: اختبار سلوك الزحف:

اختبار الزحف النموذجي يتوقف على تعريض عينة لإجهاد أو حمل ثابت مع المحافظة على درجة الحرارة ثابتة، ويقاس التشوه أو الانفعال ويرسم بيانيا كدالة في الزمن المنقضي.

معظم الاختبارات من نوع الحمل الثابت التي تنتج معلومات ذات طبيعة هندسية. اختبارات الإجهاد الثابت تستخدم لتعطي فهم أفضل لآليات الزحف. الشكل (١) يوضح تخطيط بياني نموذجي لسلوك زحف عند الحمل الثابت للمعادن.



**Figure 1** Typical creep curve of strain versus time at constant load and constant elevated temperature. The minimum creep rate  $\Delta\epsilon/\Delta t$  is the slope of the linear segment in the secondary region. Rupture lifetime  $t_r$  is the total time to rupture.

الشكل (١) لسلوك زحف عند الحمل الثابت للمعادن.

عند تطبيق الحمل وقبل حدوث الزحف يحدث تشوه فوري (لحظي) **instantaneous deformation** ويكون مرناً كلياً **totally elastic**.

منحنى الزحف الناتج يتكون من ثلاث مناطق كل منها لها هيئة انفعال-زمن مميزة:  
المنطقة الأولى: الزحف الابتدائي **primary creep** يحدث أولاً ويمثل بمعدل زحف يتناقص باستمرار لأن ميل المنحنى يتقلص مع الزمن والتشوه يصبح أكثر صعوبة كلما انضغبت المادة. يرجع ذلك لتعرض المادة لزيادة في مقاومة الزحف **creep resistance** أو تصليد (تقسية) الانفعال **strain hardening**.

المنطقة الثانية: الزحف الثانوي **secondary creep** في بعض الأحيان يسمى الزحف المستقر **steady-state creep**. معدل الزحف ثابت والمنحنى يصبح خطي وهي عادة مرحلة الزحف الأطول بقاءً. ثبات معدل الزحف يفسر على أساس التوازن بين العمليتين المتعاكستين تصليد (تقسية) الانفعال **strain hardening** والاستعادة **recovery**. الاستعادة هي العملية التي عندها المادة تصبح طرية وتحفظ بقدرتها للتعرض للتشوه.

المنطقة الأخيرة: الزحف الثالث **tertiary creep** ويكون فيه تعجيل في معدل الزحف حتى حدوث الفشل النهائي الذي عادة ما يسمى تمزق **rupture**. وينتج التمزق من تغيرات في البنية المجهرية للمادة و/أو خواصها، (مثلاً انفصال الحدود الحبيبية وتكون شقوق داخلية وتجاويف وفراغات). أيضاً نتيجة لحمل الشد قد يحدث التخصر عند نقطة معينة في منطقة التشوه. كل هذا يقود إلى تناقص في مساحة المقطع المؤثرة ولتزايد في معدل الانفعال.

لمعظم المواد الهندسية خواص الزحف لا تعتمد عملياً على اتجاه التحميل. وللمواد المعدنية معظم اختبارات الزحف تجرى عند حمل شد في محور واحد باستخدام عينات لها نفس شكل عينات اختبار الشد.

من ناحية أخرى فإن اختبارات الضغط في محور واحد تكون أكثر ملائمة للمواد القصفيه لأنه يعتبر تدبر أفضل لاختبار خواص الزحف الفعلية نسبة لعدم وجود تكبير للإجهاد ونمو للشقوق كما في تحميل الشد. وعينات اختبار الضغط عادة ما تكون في شكل اسطوانات مستقيمة لها نسبة طول إلى القطر يقع في المدى بين 2 إلى 4.

أهم الخواص التي يمكن الحصول عليها من اختبارات الزحف:

A. معدل زحف الحالة المستقرة **steady-state creep rate**

B. العمر حتى التمزق (عمر الزحف **rupture lifetime**)

A. معدل زحف الحالة المستقرة: **steady-state creep rate**

المؤشر الأكثر أهمية الذي يستخرج من اختبار الزحف هو ميل المنحنى في منطقة الزحف الثانوي ( $\Delta\epsilon/\Delta t$ ) والذي عادة ما يسمى اقل معدل زحف **minimum creep rate** أو معدل زحف الحالة المستقرة **steady-state creep rate**.

معدل زحف الحالة المستقرة ( $\dot{\epsilon}_s$ ) يدخل في اعتبارات التصميم الهندسي للتطبيقات ذات العمر الطويل مثل مكونات محطات الطاقة النووية والتي تجدرول للتشغيل عدة عقود وعندما يكون الفشل أو الانفعال الكبير ليس خيار.

**B. العمر حتى التمزق (عمر الزحف): rupture lifetime**

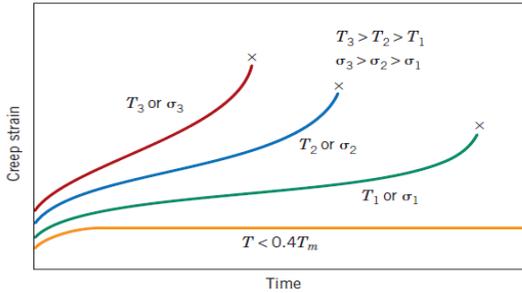
للعديد من حالات الزحف ذات العمر القصير نسبيا (مثلا ريش توربين الطائرة العسكرية وفوهات محرك الصاروخ) فان الزمن حتى التمزق **time to rupture** أو عمر التمزق **rupture lifetime** يسيطر على اعتبارات التصميم.

لتحديد العمر حتى التمزق ( $t_r$ ) يجب أن تجرى اختبارات الزحف حتى النقطة التي يحدث عندها الفشل، وفي هذه الحالة تسمى اختبارات تمزق الزحف **creep**

**rupture tests**. المعرفة بخواص الزحف ( $\dot{\epsilon}_s$  و  $t_r$ ) لمادة معينة يسمح لمهندس التصميم بالتحقق من ملائمتها للتطبيق المحدد.

### تأثيرات الإجهاد ودرجة الحرارة: Stress and temperature effects

كل من درجة الحرارة ومستوى الإجهاد المسلط يؤثران على خواص الزحف (الشكل ٢).



**Figure 2** Influence of stress  $\sigma$  and temperature  $T$  on creep behavior.

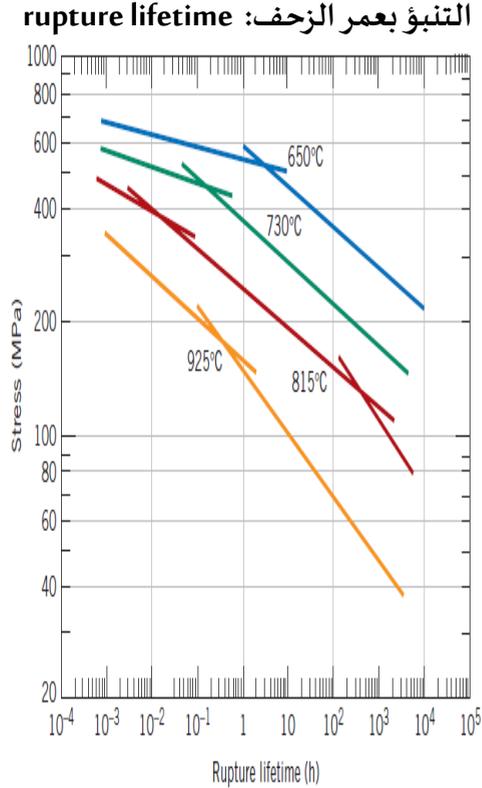
### الشكل (٢) تأثير الإجهاد ودرجة الحرارة على خواص الزحف

عند درجة حرارة اقل من  $0.4T_m$  وبعد التشوه الاستهلاكي (اللحظي) الانفعال لا يعتمد على الزمن.

بزيادة الإجهاد أو درجة الحرارة يلاحظ الآتي:

١. يزداد الانفعال اللحظي **instantaneous strain** والذي يحدث عند بداية تطبيق الإجهاد.
٢. يزداد معدل زحف الحالة المستقرة **steady-state creep rate**.
٣. يتناقص العمر حتى التمزق (**rupture lifetime**) (عمر الزحف).

**Figure 3** Stress (logarithmic scale) versus rupture lifetime (logarithmic scale) for an S-590 alloy at four temperatures. [The composition (in wt%) of S-590 is as follows: 20.0 Cr, 19.4 Ni, 19.3 Co, 4.0 W, 4.0 Nb, 3.8 Mo, 1.35 Mn, 0.43 C, and the balance Fe.]



الشكل (٣) العلاقة بين لوغاريتم الإجهاد ولوغاريتم عمر التمزق عند درجات حرارة ثابتة

نتائج اختبارات تمزق الزحف **creep rupture tests** دائما ما تعرض كرسم بياني يوضح العلاقة بين لوغاريتم الإجهاد ولوغاريتم عمر التمزق عند درجات حرارة ثابتة. الشكل (19.3) يوضح مجموعة من العلاقات الخطية التي توجد عند درجات حرارة مختلفة للسبيكة S-590.

لبعض السبائك وعند مجالات إجهاد عالية نسبيا يلاحظ أن المنحنيات تكون غير خطية.

علاقة معدل زحف الحالة المستقرة بالإجهاد:

تم تطوير علاقة تجريبية يوضح فيها معدل زحف الحالة المستقرة ( $\dot{\epsilon}_s$ ) كدالة في الإجهاد.

علاقة معدل زحف الحالة المستقرة بالإجهاد هي:

$$\dot{\epsilon}_s = K_1 \sigma^n \quad (1)$$

حيث أن:

$\sigma$ : الإجهاد.

$K_1$ : ثابت يعتمد على المادة الهندسية.

$n$ : أس الإجهاد.

رسم العلاقة بين لوغاريتم معدل زحف الحالة المستقرة ( $\dot{\epsilon}_s$ ) ولوغاريتم الإجهاد  $\sigma$  ينتج خط مستقيم ميله يساوي  $n$  كما موضح في الشكل (٤) والذي فيه خط مستقيم واحد أو خطين رسما لكل درجة حرارة.

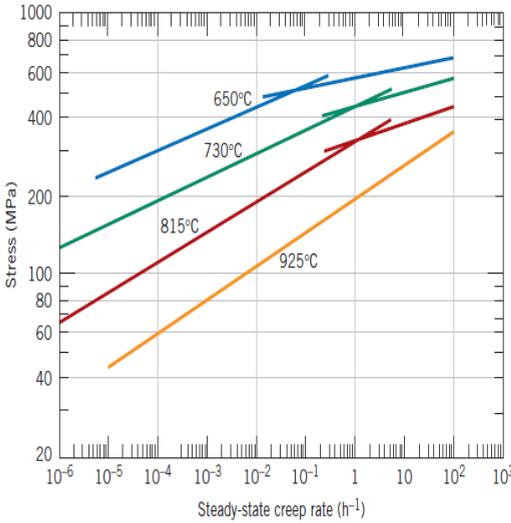


Figure 4 . Stress (logarithmic scale) versus steady-state creep rate (logarithmic scale) for an S-590 alloy at four temperatures.

الشكل (٤) العلاقة بين لوغاريتم معدل زحف الحالة المستقرة ( $\dot{\epsilon}_s$ ) ولوغاريتم الإجهاد  $\sigma$  لسبيكة معينه  
علاقة معدل زحف الحالة المستقرة بالإجهاد ودرجة الحرارة معا:

تم تطوير علاقة تجريبية يوضح فيها معدل زحف الحالة المستقرة ( $\dot{\epsilon}_s$ ) كدالة في الإجهاد ودرجة الحرارة معا:

$$\dot{\epsilon}_s = K_2 \sigma^n \exp \left( - \frac{Q_c}{RT} \right) \quad (2)$$

حيث أن:

$K_2$  و  $Q_c$ : ثابتان يعتمدان على المادة الهندسية ( $Q_c$  تسمى طاقة التنشيط للزحف).

$T$ : درجة الحرارة المطلقة (بالكلفين)

$R$ : ثابت الغاز (قيمه تساوي 8.314)

### طرق استقراء البيانات: Data extrapolation methods

الحاجة دائما ما ترتفع لبيانات الزحف الهندسية والتي تجمع تجريبا من اختبارات معملية قياسية تستغرق فترات طويلة (سنوات عديدة).

احد الحلول لهذه المشكلة يتضمن إجراء اختبارات الزحف و/أو اختبارات تمزق الزحف **creep rupture tests** لفترات زمنية قصيرة عند درجات حرارة عالية تتجاوز تلك المطلوبة، وعند مستوى إجهاد عالية بعد ذلك يتم عمل الاستقراء المناسب لحالة الجزء الهندسي أثناء الخدمة.

إحدى طرق الاستقراء الشائعة الاستخدام تستعمل دلالة لارسون - ميلر **Larson-Miller parameter** والتي تعرف كالتالي:

$$T(C + \log t_r) \quad (3)$$

حيث أن:

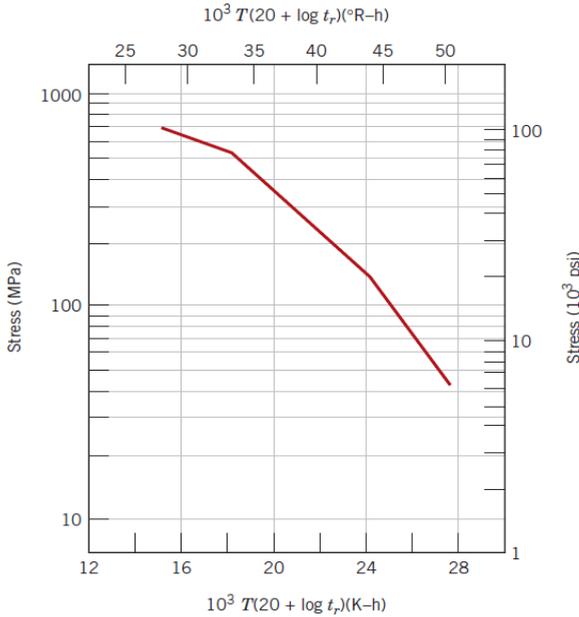
$C$ : ثابت (عادة ما يساوي 20).

$T$ : درجة الحرارة بالكلفين.

$t_r$ : عمر التمزق بالساعات.

عمر التمزق (الزحف) للمادة المقاس عند مستوى إجهاد محدد يتغير مع درجة الحرارة (علاقة عكسية) لذلك قيمة دلالة لارسون - ميلر تظل ثابتة.

ترسم البيانات في منحني يمثل العلاقة بين لوغاريتم الإجهاد ومؤشر لارسون - ميلر كما في الشكل (٥).



**Figure 5** Logarithm of stress versus the Larson–Miller parameter for an S-590 alloy.

الشكل (٥) العلاقة بين لوغاريتم الإجهاد ومؤشر لارسون-ميلر

## DESIGN EXAMPLE

### Rupture Lifetime Prediction

Using the Larson–Miller data for the S-590 alloy shown in Figure 19.5 predict the time to rupture for a component that is subjected to a stress of 140 MPa (20,000 psi) at 800°C (1073 K).

#### Solution

From Figure 19.5 at 140 MPa (20,000 psi) the value of the Larson–Miller parameter is  $24.0 \times 10^3$ , for  $T$  in K and  $t_r$  in h; therefore,

$$\begin{aligned} 24.0 \times 10^3 &= T(20 + \log t_r) \\ &= 1073(20 + \log t_r) \end{aligned}$$

and, solving for the time,

$$\begin{aligned} 22.37 &= 20 + \log t_r \\ t_r &= 233 \text{ h (9.7 days)} \end{aligned}$$

## السبائك المستخدمة لدرجات الحرارة العالية:

### Alloys for high-temperature use

هناك عدد من العوامل تؤثر على خواص الزحف للمعادن تشمل:

١. درجة حرارة الانصهار **Melting temperature**.

٢. ومعامل المرونة **Modulus of elasticity**.

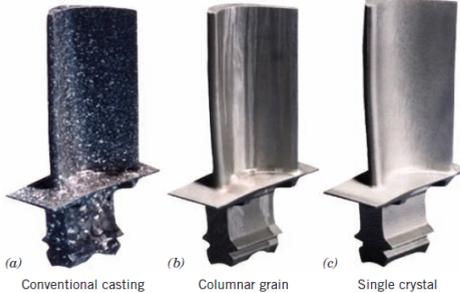
٣. حجم الحبيبات **Grains size**.

بصورة عامة كلما كانت درجة حرارة الانصهار مرتفعة ومعامل المرونة كبير وحجم الحبيبات كبير كلما كانت مقاومة المادة للزحف أفضل.

بالنسبة لحجم الحبيبات كلما كان صغيرا هذا يعني انزلاق اكبر للحدود الحبيبية مما ينتج عنه معدل زحف عالي. وهذا التأثير يتعاكس مع تأثير حجم الحبيبات على السلوك الميكانيكي عند درجات الحرارة المنخفضة (مثلا زيادة كل من مقاومة الشد **strength** والقساوة **toughness**).

الفولاذ المقاوم للصدأ **stainless steels** والسبائك الخارقة **superalloys** تكون بصورة خاصة مقاومة للزحف وتستخدم كثيرا في التطبيقات التي تخدم عند درجة الحرارة العالية.

مقاومة الزحف لهذه السبائك تحسن بتكوين محاليل الصلبة **solid solution** وأطوار كيميائية المترسبة **precipitate phases** مما تقلل من حركة الانخلاعات وانزلاق الحدود الحبيبية. بالإضافة لذلك يتم استخدام تقنيات متقدمة، إحدى هذه التقنيات هي التجمد الاتجاهي **directional solidification** والتي تنتج إما حبيبات عالية الاستطالة **highly elongation grains** أو منتجات من بلورة واحدة **single-crystal component** كما في الشكل (٦).



**Figure 6** (a) Polycrystalline turbine blade that was produced by a conventional casting technique. High-temperature creep resistance is improved as a result of an oriented columnar grain structure (b) produced by a sophisticated directional solidification technique. Creep resistance is further enhanced when single-crystal blades (c) are used.

الشكل (٦) مقارنة بين استخدام السبائك التقليدية واستخدام التجمد الاتجاهي **directional solidification** لريشة توربين

## المراجع

### A. المراجع العربية:

- (1) أ.هيكينس، ترجمة جورج يعقوب ورضا محمد، " الميـتالورجـيا الهندسية "، دار التقني للطباعة والنشر
- (2) د.عطا عبد الله فضل الله، "محاضرات ومذكرات"، كلية الهندسة جامعة وادي النيل، 1995-2001.
- (3) د.الأمين عبد الجليل محمود، "علم وهندسة المواد"، الطبعة الثانية، مطبعة جي تاون، 2007.
- (4) د.احمد زكي حلبي، "أساسيات تكنولوجيا التصنيع (تشكيل المعادن بدون قطع)"، الدار المصرية للعلوم.
- (5) محمد صلاح الدين وإبراهيم موسى ، "تكنولوجيا الإنتاج والتصنيع"، المجلد الأول.

### B. المراجع الأجنبية:

- 1) William and David , "Materials Science and Engineering An Introduction", Eighth edition, John Wiley & Sons, Inc. (USA), 2009.
- 2) Donald R. Askeland, "Essentials of Materials Science and Engineering", Second Edition, Cengage Learning, 2010.

## المحتويات

رقم	الموضوع
5	<b>الباب الأول : مقدمة عن المواد الهندسية</b>
7	<b>الفصل الأول : المواد الهندسية</b>
7	- تصنيف المواد الهندسية
10	- اختيار المواد الهندسية
10	- خواص المواد الهندسية
11	- الخواص الميكانيكية للمواد الهندسية
12	- اختبارات المواد الهندسية
13	<b>الفصل الثاني: اختبارات الخواص الميكانيكية</b>
13	- أهمية إجراء الاختبارات الميكانيكية للمعادن
13	- اختبار الشد
18	- اختبار الصدم
21	- اختبار الصلادة
25	<b>الفصل الثالث: البنية التركيبية للمواد البلورية</b>
25	- البنية البلورية للفلزات
27	- المكعب البسيط
27	- المكعب ممرکز الجسم
29	- المكعب ممرکز الوجه
30	- السداسي محكم الرص
32	<b>الفصل الرابع: خلل التركيب البلوري</b>
32	- الخلل النقطي
34	- الانخلاعات الخطية (الخلل الخطي)
35	- الخلل السطحي
36	- تكوين الحبيبة
37	<b>الباب الثاني المعادن الحديدية</b>
39	<b>الفصل الأول: المعادن الحديدية</b>
39	- الحديد النقي
39	- الحديد وخاصية التأصل
40	- الحديد الصناعي
41	- منحى التوازن الحراري للحديد والكربون
41	- أطوار الحديد و الكربون
41	- نقاط التحول الحرج في مخطط الاتزان للحديد والكربون
43	- الخطوط الحرجة في مخطط الاتزان للحديد الكربون

الموضوع	رقم
<b>الفصل الثاني: الصلب الكربوني العادي</b>	45
- أولا: سبيكة تحتوى على 0.38% كربون	45
- ثانيا: سبيكة تحتوى على 0.76% كربون	47
- ثالثا: سبيكة تحتوى على 1.4% كربون	48
- الشوائب في الصلب	50
- استخدامات الصلب الكربوني	51
- العلاقة بين نسبة الكربون والخواص الميكانيكية للصلب	52
<b>الفصل الثالث: المعالجات الحرارية للفولاذ (الصلب الكربوني) جزء 1</b>	53
- المعالجات الحرارية	53
- التخمير	54
- التخمير لإزالة الإجهادات	55
- تخمير التكور	55
- تخمير المسبوكات	56
- المعادلة أو المعايرة	58
<b>الفصل الرابع: المعالجات الحرارية للفولاذ (الصلب الكربوني) جزء 2</b>	59
- التقسية	59
- المراجعة (تطوع الفولاذ)	61
- تحول المارتنسايت	62
<b>الفصل الخامس: المعالجات الحرارية للفولاذ (الصلب الكربوني) جزء 3</b>	63
- التحولات عند درجات الحرارة الثابتة	63
- وصف منحى التحول عند درجات الحرارة الثابتة (TTT-curves)	65
- منحنيات التحول TTT-curves والتبريد المستمر	66
- تأثير الكربون والعناصر السبائكية على منحى التحول TTT-curve	68
- التطبيقات العملية الناتجة من دراسة منحنيات التحول عند درجات الحرارة	68
<b>الفصل السادس: التصليد السطحي للفولاذ (الصلب الكربوني)</b>	71
- فوائد التصليد السطحي	71
- التغليف السطحي	71
- الكرننة السطحية	72
- النتردة السطحية	74
- الكاربونتردة	76
- التقسية السطحية باللهب	76
- التقسية السطحية بالتيارات التأثيرية (الحث الكهربي)	77
<b>الفصل السابع: الصلب السبائكي</b>	79
- الأهداف الرئيسية من إضافة العناصر السبائكية إلى الصلب	79

رقم	الموضوع
79	- أثر إضافة العناصر السبائكية للفلوئاذ
81	- أهم العناصر السبائكية
83	- تصنيف الصلب السبائكي
84	<b>الفصل الثامن: الحديد الزهر</b>
84	- أهم العوامل التي تؤثر على خواص وأنواع الحديد الزهر
84	- تأثير التركيب الكيميائي على البنية الداخلية للحديد الزهر
86	- تأثير معدل التبريد على البنية الداخلية للحديد الزهر
88	- البنية الداخلية للحديد الزهر
88	- أنواع واستخدامات الحديد الزهر
91	<b>الباب الثالث: المعادن الغير حديدية</b>
93	<b>الفصل الأول: النحاس وسبائكه</b>
93	- أهم الخواص المميزة للنحاس
94	- أنواع النحاس التجارية
95	- سبائك النحاس
103	<b>الفصل الثاني: الألمونيوم وسبائكه</b>
104	- سبائك الألمنيوم
104	- السبائك المطاوعة التي لا تعالج حراريا
105	- السبائك المسبوكة التي لا تعالج حراريا
106	- السبائك المطاوعة التي تعالج حراريا
107	- السبائك المسبوكة التي تعالج حراريا
109	<b>الباب الرابع: فشل المواد الهندسية</b>
111	<b>الفصل الأول: طرق فشل المواد الهندسية أثناء الاستعمال</b>
111	- لماذا يدرس فشل المواد الهندسية
111	- طرق الفشل الأساسية
112	- الكسر والتمزق
112	- الكلال والفشل الكلالي
113	- الزحف وفشل الزحف
114	- التآكسد والتآكل
115	- الاحتكاك والبلبي
116	<b>الفصل الثاني: الكسر</b>
116	- المبادئ الأساسية للكسر
117	- الكسر المطيلي
121	- الكسر القصفي
124	<b>الفصل الثالث: قواعد ميكانيكا الكسر</b>

رقم	الموضوع
124	- تركيز الإجهاد
125	- حساب الإجهاد الأقصى عند مقدمة الشق (لحمل الشد)
126	- الإجهاد الحرج المطلوب لنمو الشق في المواد القصفيه
127	- قساوة (متانة) الكسر
128	- قساوة (متانة) الكسر للانفعال المستوى
130	- التصميم باستخدام ميكانيكا الكسر
131	- العيوب والاختبارات اللائقافية
132	<b>الفصل الرابع: فشل الكلال</b>
132	- الإجهادات الدورية
134	- منحنى الكلال S-N
135	- اختبارات الكلال
138	- نشوء الشق ونموه
141	- العوامل التي تؤثر على عمر الكلال
144	- تأثيرات البيئة
146	<b>الفصل الخامس: فشل الزحف</b>
146	- آليات (طرق) سلوك الزحف
148	- اختبارات سلوك الزحف
150	- تأثيرات الإجهاد ودرجة الحرارة
153	- طرق استقراء البيانات
155	- السبائك المستخدمة لدرجات الحرارة العالية
156	<b>المراجع</b>
157	<b>المحتويات</b>