



علم المواد وهندستها

**MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**

السنة: الثانية  
القسم: هندسة التصميم الميكانيكي  
الاختصاص: هندسة الغزل والنسيج والهندسة الطبية

جامعة دمشق  
Damascus University





منشورات جامعة دمشق  
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

# علم المواد وهندستها

MATERIALS SCIENCE  
AND ENGINEERING

الدكتور

فؤاد ضحية

أستاذ مساعد

الدكتور

خليل عزيمة

أستاذ مساعد

جامعة دمشق



# الفهرس

## الصفحة

11

مقدمة

13

## الفصل الأول: بنية المادة

16

1.1 عناصر البلورات

16

1.1.1 الشبكة البلورية

24

2.1.1 إشارات البلورات

27

2.1 تأثير شكل الترابط على بنية وخواص البلورات

27

1.2.1 ارتباط الجزيئي

29

2.2.1 الارتباط المشترك ( التكافؤي )

29

1. 2. 3. الارتباط المعدني

30

4.2.1 الارتباط الايوني

31

3.1 عيوب الهياكل الشبكية

32

1.3.1 العيوب النقطية

33

2.3.1 العيوب الخطية

35

3.3.1 العيوب السطحية

37

## الفصل الثاني: تبلور المادة

39

2 - 1 التبلور

44

2 - 2 آلية التبلور

45

2 - 3 التحولات الطورية للمعدن ( الالتروبية )

47

2 - 4 بنية المعادن المصبوبة

|    |                                                           |
|----|-----------------------------------------------------------|
| 58 | <b>الفصل الثالث: السبائك المعدنية</b>                     |
| 56 | 3-1 تصنيف السبائك المعدنية الثنائية                       |
| 56 | 3-2 أنواع النظم السبائكية                                 |
| 62 | 3-3 تركيب السبائك                                         |
| 63 | 3-4 قانون الطور ( قانون جيبس الطوري )                     |
| 65 | 3-5 مخططات التوازن للخلائط المعدنية الثنائية              |
| 71 | 3-6 قانون العتلة                                          |
| 74 | 3-7 أنواع مخططات التوازن                                  |
| 97 | 3-8 مخططات التوازن للخلائط التي تحدث فيها تغيرات التروبية |

|     |                                               |
|-----|-----------------------------------------------|
| 105 | <b>الفصل الرابع: فحص بنية المادة</b>          |
| 107 | 4-1 الفحص الماكروسكوبي (العيني) للمادة        |
| 110 | 4-2 الفحص المجهرى ( الميكروسكوبي ) للمادة     |
| 130 | 4-3 الفحص بالمجهر الإلكتروني                  |
| 133 | 4-4 تحليل البنية باستخدام الأشعة السينية      |
| 137 | 4-5 الطرق الفيزيائية لدراسة المادة            |
| 137 | 4-5-1 طريقة التحليل الحراري                   |
| 138 | 4-5-2 الطريقة التمددية                        |
| 139 | 4-5-3 طريقة قياس المقاومة الكهربائية          |
| 139 | 4-5-4 طريقة اقتران أثر النظائر المشعة         |
| 141 | <b>الفصل الخامس: اختبارات كشف عيوب المادة</b> |
| 143 | 5-1 طريقة الاختبار باستخدام السوائل الكاشفة   |

- 144 5 - 2 طريقة الاختبار باستخدام أشعة الليزر  
145 5 - 3 طريقة الاختبار باستخدام الأشعة النافذة  
147 5 - 4 طريقة الاختبار باستخدام الحقل المغناطيسي  
149 5 - 5 طريقة الاختبار باستخدام التيارات الإعصارية  
151 5 - 6 طريقة الاختبار باستخدام الأمواج فوق صوتية  
156 5 - 7 ملخص لطرق الاختبارات غير المتلفة واستخداماتها

### 159 الفصل السادس: الاختبارات الميكانيكية للمواد

- 161 6 - 1 اختبار الشد  
173 6 - 2 اختبار الضغط  
174 6 - 3 اختبار الانحناء ( الانعطاف )  
180 6 - 4 اختبار الفتل  
183 6 - 5 اختبار القص  
185 6 - 6 اختبار القساوة ( الصلادة )  
198 6 - 7 اختبار الصدم  
201 6 - 8 اختبار التعب  
205 6 - 9 اختبار الثني  
206 6 - 10 اختبار السحب  
207 6 - 11 اختبار الزحف

### 211 الفصل السابع: تآكل المواد

- 213 7. 1 التآكل  
214 7. 2 قياس التآكل  
215 7. 3 العملية الكهروكيميائية في التآكل

|     |                                                   |
|-----|---------------------------------------------------|
| 219 | 7. 4 التآكل الجوي                                 |
| 224 | 7. 5 التآكل في المياه                             |
| 227 | 7. 6 التآكل في التربة                             |
| 233 | <b>الفصل الثامن: الحديد والفولاذ</b>              |
| 235 | 1.8 مخطط الحديد والكربون                          |
| 259 | 2.8 المعالجات الحرارية للحديد والفولاذ            |
| 285 | 3.8 تصنيف الفولاذ                                 |
| 301 | <b>الفصل التاسع: المعادن غير الحديدية</b>         |
| 303 | 1.9 الألمنيوم وسبائكه                             |
|     | 1.1.9 سبائك الألمنيوم                             |
|     | 2.1.9 المعالجات الحرارية لسبائك الألمنيوم         |
| 315 | 2.9 النحاس وسبائكه                                |
|     | 1.2.9 سبائك النحاس                                |
|     | 2.2.9 المعالجات الحرارية لسبائك النحاس            |
| 326 | 3.9 النيكل وسبائكه                                |
| 331 | 4.9 التيتانيوم وسبائكه                            |
| 335 | 5.9 المنغنسيوم وسبائكه                            |
| 338 | 6.9 المعادن صعبة الانصهار                         |
| 347 | <b>الفصل العاشر: المواد المركبة</b>               |
| 350 | 1.10 تصنيف المواد المركبة                         |
| 351 | 2.10 سمات مواد التسليح والتعبئة في المواد المركبة |
| 353 | 3.10 المواد المركبة المعدنية                      |

- 365 4.10 المواد المركبة البوليميرية  
369 5.10 المواد المركبة الكربونية  
370 6.10 المواد المركبة التريبولوجية

### الفصل الحادي عشر: المواد السيراميكية ذات

373

#### الاستخدام العددي والإنشائي

- 375 1.11 مقدمة  
375 2.11 المواد السيراميكية ذات الاستخدام العددي  
381 3.11 المواد السيراميكية ذات الاستخدام الإنشائي  
381 4.11 المواد عالية الخزفية

### الفصل الثاني عشر: الحل الأمثل في اختيار المواد

391

#### لتصنيع الأجزاء الهندسية

- 393 1.12 اختيار المواد المعدنية من أجل المقاومة  
397 2.12 اختيار المواد المعدنية من أجل مقاومة الحرارة  
398 3.12 ما هي المعادن التي يجب أن نستعملها؟  
400 4.12 اختيار المواد المعدنية بهدف مقاومة التعب  
402 5.12 اختيار المواد المعدنية بهدف المتانة

404

#### المصادر العلمية

406

#### قاموس المصطلحات العلمية





## المقدمة

يعرف علم المواد بأنه العلم التطبيقي المتعلق بتركيب وبنية وخواص المواد. ويعتمد حل المشاكل التقنية المهمة، مثل الاقتصاد بالمواد وخفض كثلة الآلات والأجهزة ورفع دقة ووثوقية عملها وخفض استهلاك المواد ورفع المتانة ومقاومة التآكل وغيرها، على تطور علم المواد.

لقد بدأ التطور الكبير في علم المواد على يد العالم الروسي أناسوف (1799-1851) حيث وضع أول علاقة بين بنية الفولاذ وخواصه، وتابع عمله العالم تشرنوف (1839-1921). كما ساهم كلاً من الفرنسيين لي شاتيه وأسموند والإنكليزي أوستين في تطوير علم المواد بوضعهم دراسات حول خلاط الفولاذ الكربوني.

إن الأساس النظري لعلم المواد هو علمي الفيزياء والكيمياء، ولكن يتطور علم المواد عن طريق التجارب المخبرية والأبحاث التطبيقية. ولهذا تعطي الطرق الجديدة لبحث البنية والخواص الفيزيائية والميكانيكية للمواد دعماً في تطور هذا المجال، وذلك عن طريق انشاء مواد جديدة للتقانات الحديثة مثل البوليمرات والمواد المركبة والسيراميكية وفق خواص محددة سلفاً.

يتألف هذا الكتاب من اثني عشر فصلاً تتناول بنية وتبلور المادة ونظرية الخلاط المعدنية ومخططاتها وطرق التعرف على البنية الداخلية وعيوبها واختباراتها. كما يتناول التعريف بأهم المواد المستخدمة في الصناعات الحديثة بما فيها المواد الجديدة، بحيث يغطي منهاج طلاب السنة الثانية اختصاص هندسة الغزل والنسيج وطلاب الهندسة الطبية. كما يمكن أن يستعين به المهندسون والعاملون في مجالات الصناعة المختلفة فنرجو أن نكون قد وفقنا في ردف المكتبة العلمية بهذا الكتاب.

د. خليل عزيمة ، د. فواد ضحية



## الفصل الأول بنية المادة

- 1.1 عناصر البلورات
- 2.1 تأثير شكل الترابط على بنية وخواص البلورات
- 3.1 عيوب الهياكل الشبكية



## بنية المادة

### Structure Of Materials

يوجد في الطبيعة نوعين من الجسم الصلب مختلفين من ناحية الخواص: الأجسام البلورية والأجسام اللابلورية (الأمورفية). تبقى الأجسام البلورية صلبة وتحافظ على شكلها حتى درجة حرارة معينة التي تبدأ عندها الأجسام الصلبة بالتحول إلى الحالة السائلة أثناء التسخين والتحول من الحالة السائلة إلى الصلبة عند التبريد، ودرجة الحرارة هذه محددة هي درجة حرارة انصهار المادة.

تصبح الأجسام اللابلورية عند التسخين طرية ولدنة وذلك في مجال حراري كبير وبعدها تتحول إلى الحالة السائلة، وتحدث عند التبريد حالة عكسية. إن الحالة البلورية للأجسام أكثر استقراراً من الحالة اللابلورية. وتتميز الأجسام اللابلورية عن السوائل بأن حركة جزيئاتها منخفضة. ويمكن ملاحظة الحالة اللابلورية في كثير من المواد العضوية واللاعضوية في ظروف التبريد السريع من الحالة السائلة. تتحول أحياناً الأجسام الصلبة اللابلورية غير المستقرة بشكل جزئي أو كلي إلى الحالة البلورية وذلك عند إعادة التسخين أو الإبقاء الطويل في درجات الحرارة  $20-25^{\circ}\text{C}$  وكذلك عند بعض حالات التشوه.

تتصف الأجسام البلورية بتوضع منتظم في الفراغ للأجزاء الأساسية التي يتألف منها (الأيونات، الذرات، الجزيئات). وتعتمد خواص البلورات على:

1. البنية الإلكترونية للذرات وطبيعة التأثير المتبادل بينها داخل

البلورة؛

2. التوزيع الفراغي للأجزاء الأساسية؛

### 3. التركيب الكيميائي وأبعاد وشكل البلورات.

وهذا يشرح مفهوم البنية، ويمكن بالاعتماد على أبعاد البنية تمييز المفاهيم التالية: البنية الرقيقة والبنية الميكروية والبنية الماكروية.

تبين البنية الرقيقة توضع الأجزاء الرئيسية في البلورة والإلكترونات

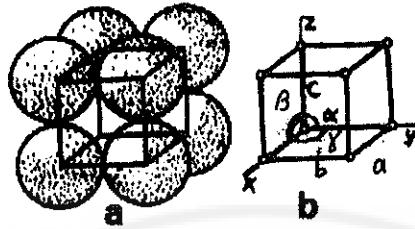
في الذرة، وتدرس في الأشعة السينية بأطوال موجية  $\lambda = 10^{-10} \div 10^{-12} \text{ m}$  وتعطي معلومات عامة عن بنية البلورات. تتألف معظم المواد من بلورات صغيرة (حببيات)، ويمكن ملاحظة هذه البنية الناعمة (الميكروية) بواسطة المجهر الضوئي أو الإلكترون. تسمح الطرق المجهرية بتحديد أبعاد وشكل البلورات ووجود بلورات غريبة وشكل الشوائب والفراغات الميكروية وغيرها.

يمكن دراسة بنية البلورات (البنية الماكروية) بالعين المجردة أو بالتكبير البسيط بواسطة العدسات وتحديد سمات الكسر والمساحات وتحديد شكل وأبعاد البلورات الضخمة، كما يمكن باستخدام طرق خاصة لتحضير العينات (شحذ، صقل، تخريش) ملاحظة الشقوق وعدم التجانس الكيميائي. ورغم بساطة طريقة الدراسة الماكروية إلا أنها من الطرق القيمة لدراسة المواد.

#### 1.1 عناصر البلورات:

##### 1.1.1 الشبكة البلورية:

تتقارب الأجزاء الأساسية (الايونات، الذرات، الجزيئات) التي تتألف منها البلورة حتى التلامس وتتوضع بشكل منتظم في مختلف الاتجاهات (الشكل 1-1 a). ولتسهيل فهم المخطط الفراغي لتوضع الذرات ترسم الخلية البلورية بشكل تخطيطي يبين فيه مراكز ثقل الذرات فقط (الشكل 1-1 b).



الشكل 1-1

توضع الذرات في الخلية البلورية

a. بشكل فراغي

b. بشكل تخطيطي

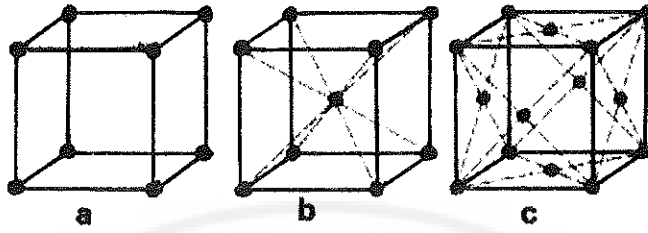
إذا رسم على المخطط الشبكي محاور إحداثية ثلاثة  $x, y, z$  في ثلاث مستويات فإن المسافة بين الذرات وفق اتجاه هذه المحاور تكون في الحالة العامة غير متساوية ومقدارها  $a, b, c$ . تقسم السطوح الموازية للمستويات الإحداثية والتي تبعد عن بعضها البعض بالمقادير  $a, b, c$  الخلية البلورية إلى متوازي سطوح الذي يسمى الهيكل الشبكي ويحدد بنية البلورة. تستخدم لشرح الهيكل الشبكي ستة قيم: ثلاث أطوال مساوية للمسافة بين أقرب ذرات وفق محاور الإحداثيات (الأبعاد  $a, b, c$ ) وثلاث زوايا بين هذه الأطوال ( $\alpha, \beta, \gamma$ ). تحدد هذه القيم شكل الهيكل الشبكي ويبين الجدول 1-1 أنواع الهياكل الشبكية حسب قيم الأطوال والزوايا.

لا تتوضع الذرات في معظم الحالات فقط في زوايا الهيكل الشبكي وإنما أيضاً على الأوجه ومراكز الهيكل (الشكل 2-1). تحدد درجة التعقيد

حسب عدد الذرات التي يحتويها الهيكل الشبكي، حيث يحتوي الهيكل الشبكي البسيط دائماً على ذرة واحدة في كل زاوية من الزوايا الثمانية ( الشكل 1-2 a). لكن من جهة أخرى فإن كل ذرة من هذه الذرات تنتمي إلى ثمانية هياكل شبكية، وبعبارة أخرى فإن كل زاوية من الزوايا تحتوي على  $1/8$  ذرة أي أن الهيكل الشبكي البسيط يحتوي على ذرة واحدة. لكن يوجد دائماً في الشكل الفراغي المعقد للهيكل الشبكي الواحد أكثر من ذرة. إذا وضعت ذرة إضافية واحدة في مركز الهيكل الشبكي ( الشكل 1-2 b) أصبح عدد الذرات في هذا الهيكل ذرتان ( ذرة على رؤوس الهيكل الشبكي  $1/8$  ذرة  $8 \times$  وأخرى في مركز الهيكل تنتمي بكاملها له ) ويسمى هذا الشكل بالهيكل الشبكي المتمركز حجمياً. يحتوي الهيكل الشبكي المتمركز وجهياً ( الشكل 1-2 c ) أربع ذرات: واحدة على رؤوس الهيكل الشبكي ( $1/8$  ذرة  $8 \times$ ) وثلاث ذرات في مركز كل وجه من الأوجه الستة ( $1/2$  ذرة  $6 \times$ ) وذلك لأن كل ذرة متمركزة في أحد الأوجه تنتمي بوقت واحد إلى هيكليين شبكيين متجاورتين.

يحدد كلاً من نوع الهيكل الشبكي وطبيعته وعدد الذرات فيه توضع الأجزاء الرئيسية في البلورة. و تستخدم في حالات كثيرة سمات إضافية للهيكل الشبكي معتمدة على الشكل الهندسي وتعكس كثافة توضع الذرات في البلورة، من هذه السمات: رقم الإحداثيات ونسبة ملئ الفراغ. يعبر رقم الإحداثيات عن عدد الذرات التي تلامس ذرة واحدة في الهيكل الشبكي الواحد، على سبيل المثال، في الهيكل الشبكي من نوع مكعب متمركز حجمياً يكون رقم الإحداثيات مساوياً لثمانية وللمكعب البسيط مساوياً لستة وللمتمركز وجهياً مساوياً لـ 12 والشكل 1-3 يوضح ذلك.



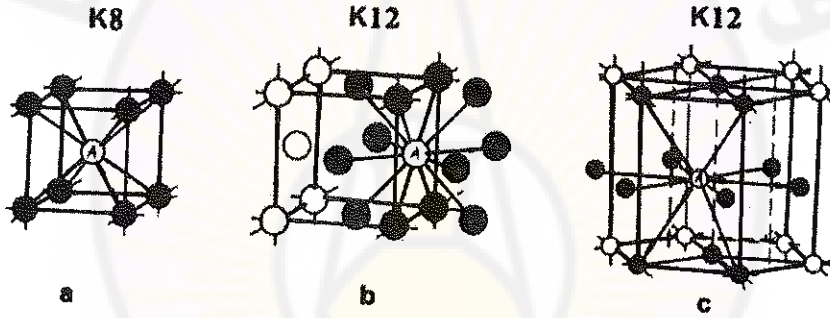


الشكل 2-1

أنواع الهياكل الشبكية الرئيسية

a. بسيط

b, c. معقد



الشكل 3-1

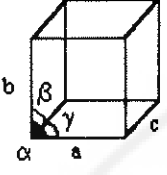
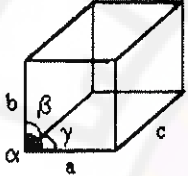
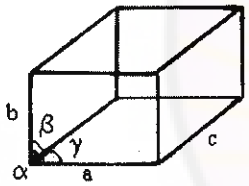
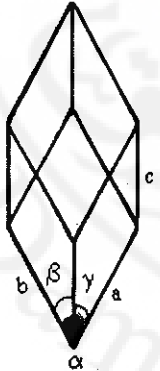
حساب رقم الإحداثيات للهياكل الشبكية

a. للمكعب المتمركز حجمياً  $K = 8$

b. للمكعب المتمركز وجهياً  $K = 12$

c. للسداسي المنتظم  $K = 12$

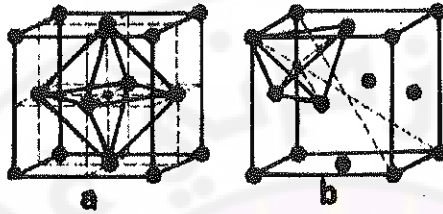
الجدول 1-1 الأنواع الرئيسية للهياكل الشبكية

| النوع             | أطوال الحروف      | الزوايا                                 | الشكل التخطيطي                                                                      |
|-------------------|-------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| المكعب            | $a = b = c$       | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$    |    |
| الشكل الرباعي     | $a = b \neq c$    | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$    |    |
| متوازي المستطيلات | $a \neq b \neq c$ | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$    |   |
| الموشور المعيني   | $a = b = c$       | $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ |  |

| النوع                   | أطوال الحروف      | الزوايا                                           | الشكل التخطيطي |
|-------------------------|-------------------|---------------------------------------------------|----------------|
| الرباعي أحادي الميل     | $a \neq b \neq c$ | $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma \neq 90^\circ$ |                |
| الرباعي ثلاثي الميل     | $a \neq b \neq c$ | $\alpha \neq \beta \neq \gamma$                   |                |
| الموشور السداسي المنتظم | $a = b \neq c$    | $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$   |                |

تحتسب نسبة ملئ الفراغ بنسبة حجم الذرات المتواجدة في هيكل شبكي واحد إلى حجم هذا الهيكل الشبكي وتساوي هذه النسبة للهيكل الشبكي من نوع مكعب بسيط 0.52 وللمكعب المتمركز حجمياً 0.68 وللمكعب المتمركز وجهياً 0.74 (تحتسب حجوم الذرات بعد حساب قطرها بدلالة طول ضلع الهيكل الشبكي باعتبارها تتوضع متلامسة في الهيكل الشبكي). يشكل الفراغ المتبقي في الهيكل الشبكي ثقوب تشكل بينه مثنى السطوح أو رباعي السطوح، ويوضح الشكل 1-4 هذه الثقوب وتدل النقاط الصغيرة في الشكل على مراكز هذه

الثقوب. يبلغ قطر مئمن السطوح 0.41 من قطر الذرة وأما قطر الرباعي فيبلغ 0.22 من قطر الذرة.



الشكل 4-1

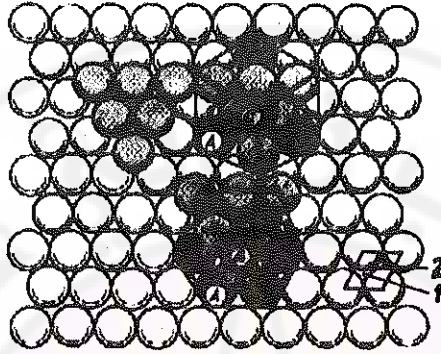
a. ثقوب تشكّل مئمن السطوح

b. ثقوب تشكّل رباعي السطوح

في الهيكل الشبكي المكعب متمركز وجهياً

تتصف معظم البلورات بتوضع كثيف للذرات، وباعتبار شكل الذرة هو كرة فإن شكل الذرات في البنية سيكون كما هو في الشكل 5-1. يتوضع على الحفرة 1 في الطبقة الأولى من الكرات والمرمزة بالحرف A الطبقة الثانية من الكرات المرمزة بالحرف B. هناك احتمالان للطبقة التالية: الأول إذا توضع الكرات فوق الطبقة الأولى فإن الهيكل الشبكي يصبح سداسي (أسفل الشكل 5-1)؛ الاحتمال الثاني إذا توضع الطبقة الثالثة من الكرات C على الطبقة الثانية فوق الحفر 2 وفقط الطبقة الرابعة من الكرات تكرر توضع الطبقة الأولى فإن الهيكل الشبكي يصبح مكعب متمركز وجهياً (أعلى الشكل 5-1). يوضح الموشور السداسي الموجود في الشكل 6-1 الهيكل الشبكي السداسي المنتظم ذو التوضع الكثيف، فيه:  $a = b \neq c$  و  $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ .

يمكن تحديد نسبة  $c/a$  انطلاقاً من الشكل السداسي فإذا كانت الذرات كروية فإن

$$c/a = 1.633$$


الشكل 5-1

التوضع الكثيف للذرات في البلورات

( الذرات A , B في هذا الشكل هي نفسها التي في الشكل 5-1 ). تعود الذرات A في الهيكل الشبكي المكعب المتمركز وجهياً إلى الطبقة الأولى أما الذرات B فتعود للطبقة الثانية والذرات C للطبقة الثالثة، والطبقة الرابعة تكرر الطبقة الأولى. يمكن عند انحراف شكل الذرات عن الشكل الكروي تشكيل بنية سداسية ذات نسبة أبعاد تختلف عن 1.633 وتكون البنية مكعب متمركز حجمياً ( أنظر إلى الشكل 6-1 ).

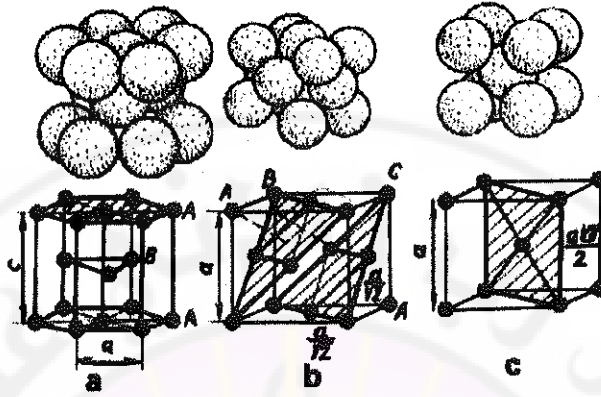
#### 2.1.1 إشارات البلورات:

تكون الخواص الهندسية للبلورة متماثلة بالاتجاهات المتوازية ولهذا يكفي بيان اتجاه واحد يمر من مركز الإحداثيات لمجموعة من الاتجاهات. وهذا يعطي إمكانية تحديد اتجاه المستقيم فقط بنقطة واحدة وذلك لأن النقطة الثانية هي

دائماً بداية الإحداثيات، وهذه النقطة هي عقدة في الهيكل الشبكي تحتوي على ذرة. يُعبر عن إحداثيات هذه العقدة بأرقام صحيحة  $u, v, w$  بواحدات جزئية من أبعاد الهيكل الشبكي  $a, b, c$  وتكتب الأرقام الصحيحة ضمن أقواس متوسطة  $[u, v, w]$  وتسمى إشارات الاتجاهات. و يُعبر عن الأرقام السالبة بوضع إشارة السالب فوق الرقم الصحيح ( أنظر إلى الشكل 1-7 - a ).

تتوضع المستويات في الفراغ بشكل أجزاء سطحية مقسمة بالمحاور  $x, y, z$  و يُعبر عن هذه الأجزاء بأرقام صحيحة  $m, n, p$  تنطبق على  $a, b, c$ . يؤخذ عادةً مقلوب هذه الأرقام  $h=1/m, k=1/n, l=1/p$  وتوضع الأرقام في أقواس صغيرة  $(h, k, l)$  وتسمى إشارات المستويات ( الشكل 1-7 - b ). إذا مر المستوى بالجزء السالب من المحور فيعبر عن ذلك بإشارات سالبة فوق الرقم المطابق للمحور.

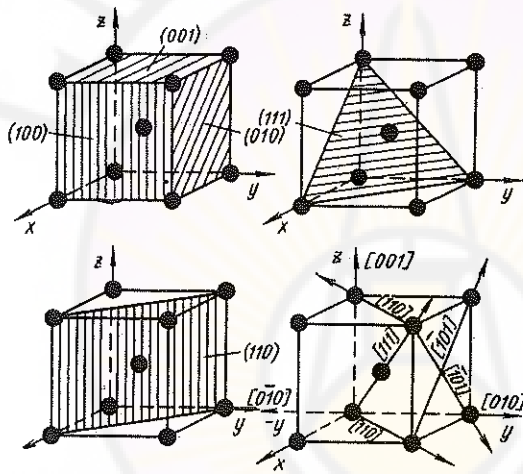
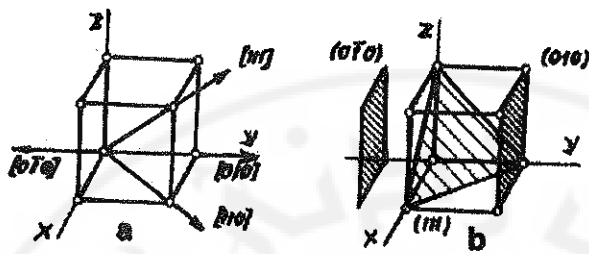
يسمى المستوى الأكثر كثافة ( الشكل 1-6 المستوي المهرش ) بمستوي الانزلاق وذلك لأنه بهذه المستويات تتحرك الذرات عند التشوه اللدن للهيكل الشبكي. يكون مستوى الانزلاق للهيكل الشبكية المكعب المتمركز وجهياً هو المستوى (111)، أما للهيكل الشبكي من نوع سداسي منتظم ذو النسبة  $c/a \geq 1.633$  يكون مستوى الانزلاق هو المستوى القاعدي ( قاعدة الموشور السداسي )، وعند نسبة  $c/a < 1.633$  يكون مستوى الانزلاق هو سطح الموشور.



الشكل 6-1

عناصر الهيكل الشبكي

- a. السداسي
- b. مكعب متركز وجهياً
- c. مكعب متركز حجمياً



c

الشكل 7-1

إشارات الاتجاهات والمستويات في الهياكل الشبكية

a. الاتجاهات

b. المستويات

c. أمثلة مختلفة



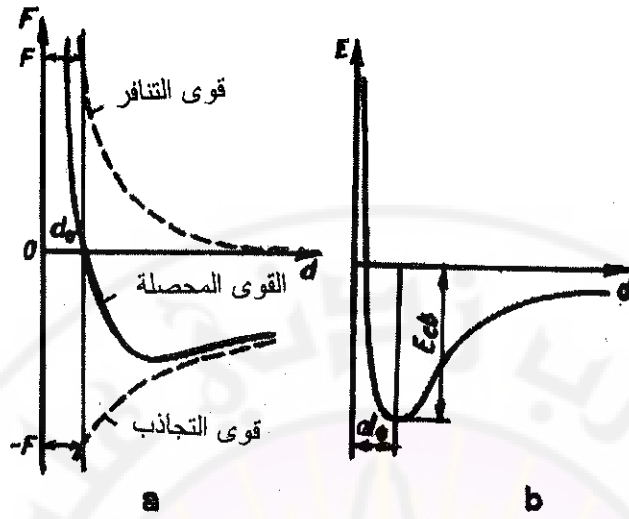
## 2.1 تأثير شكل الترابط على بنية وخواص البلورات:

يحدد شكل الارتباط بين الذرات في البلورات بواسطة البناء الالكتروني للذرات المترابطة. تقترب الذرات في الهياكل الشبكية إلى مسافة محددة والتي تؤمن للهيكل الشبكي الاستقرار الترموديناميكي الأكبر. وتحدد المسافة بين الذرات بالقوى المؤثرة بين الذرات. تنشأ قوى التجاذب من التأثير المتبادل بين الالكترونات والنواة الموجبة للذرة نفسها وكذلك للذرة المجاورة. بينما تنشأ قوى التنافر نتيجة تأثير الشحنة الموجبة في قوى الذرات المجاورة عند اقترابها من بعضها.

تظهر قوى التنافر عند الاقتراب الكبير وتزداد بشكل أكبر من قوى التجاذب ( الشكل 1-8). تتوازن قوى التجاذب وقوى التنافر عند اقتراب الذرات من بعضها إلى مسافة  $d_0$  والتي توافق طاقة ارتباط دنيا  $E_0$  تجعل الهيكل الشبكي مستقر وتحدد درجة حرارة الانصهار والتبخر ومعامل المرونة ومعامل التوصيل الحراري وغيرها.

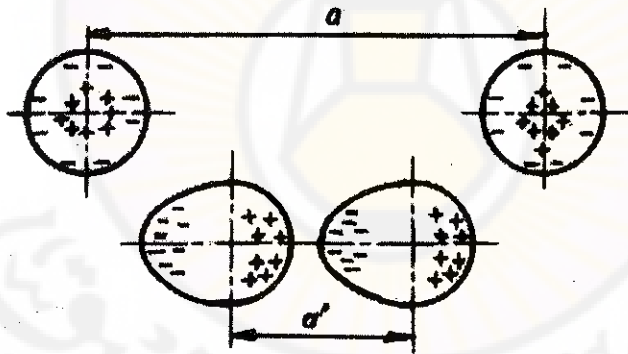
### 1.2.1 ارتباط الجزيئي:

ينشأ هذا النوع من الارتباط نتيجة قوى فان - در - فاس ( Van-der-Waals ) بين الذرات التي تنشأ بسبب عدم انطباق مركز الشحنة السالبة على مركز الشحنة الموجبة للذرة نظراً لحركة الالكترونات وتشكل ما يشبه المغناطيس الكهربائي ثنائي الأقطاب ( الشكل 1-9 ) ويحصل هذا الارتباط دائماً بين ذرات بعض الغازات في درجات حرارة منخفضة.



الشكل 8 - 1

قوى التأثير ( a ) وطاقة الارتباط ( b ) بين الذرات في الهيكل الشبكي



الشكل 9 - 1

تشكل المغناطيس الكهربائي في الارتباط الجزيئي  
( غاز الارغون )

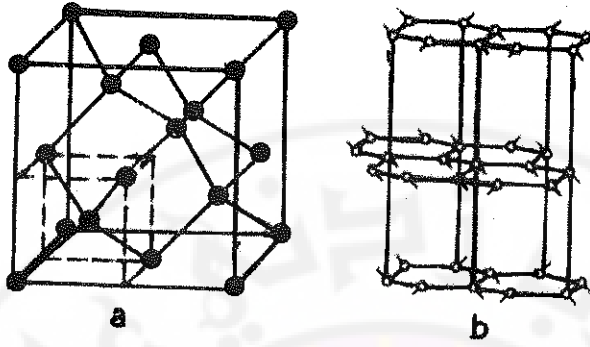
### 2.2.1 الارتباط المشترك ( التكافوي ):

يتم هذا النوع من الارتباط بين ذرات عناصر المجموعات IV, V, VI في المجال  $\beta$  من الجدول الدوري للعناصر، وهذه العناصر ذات شحنة سالبة بسبب أنها تحتوي على جهد تأين عالي وعندما ترتبط مع ذرات مجموعات أخرى تختار الكترنات التكافؤ لتشبع مداراتها الخارجية بالالكترونات وتتجمع الذرات مع بعضها وتشكل منطقة تكافؤ.

يحصل هذا الترابط في ذرات الكربون والسيليسيوم والجرمانيوم والسيريوم وغيرها. ويعتمد عدد الذرات التي تتشارك بالكتروناتها على التكافؤ. تحتوي ذرة الكربون على أربع اتجاهات للارتباط لذلك تشترك الذرة مع أربع ذرات، حيث يحدث بين كل ذرة تبادل بالالكترونات التكافؤية. ويوجد عادة الكربون في الطبيعة بنوعين من الهياكل الشبكية (الشكل 1-10) وفي كلا النوعين فإن كل ذرة لها أربع ذرات مجاورة. تتوضع الذرات المجاورة الأربع في الهيكل الشبكي المعقد للألماس على بعد متساوي عن الذرة المركزية (مبين في الشكل ضمن المكعب المنقط). أما في الغرافيت فإن كل الذرات الأربع المجاورة تقع على مسافة أكبر.

### 3.2.1 الارتباط المعدني:

يحدث هذا الارتباط بين ذرات العناصر ذات الشحنة الموجبة حيث تملك هذه الذرات شحنة سالبة منخفضة. تعطي هذه الذرات الكترونات التكافؤية بسهولة وتتحول إلى شوارد موجبة وعندها يتجمع عدد من الذرات المتماثلة فإن كلاً منها تتخلى عن الكترونات وتتجمع الالكترونات لتصبح تابعة لكافة الذرات مجمعة وتشكل ضباب الكتروني. إن الارتباط المعدني غير موجه لأن كل ذرة تحاول أن تجذب إليها أكبر عدد من الذرات المجاورة، ونتيجة هذا يكون رقم الإحداثيات كبيراً.



الشكل 1 - 10

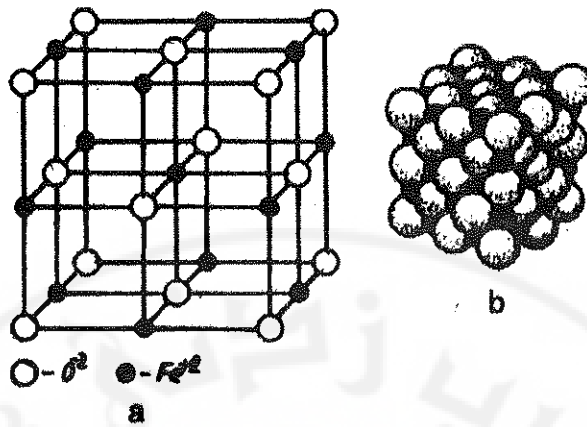
الهيكل الشبكي

a. للألماس

b. للغرافيت

#### 4.2.1 الارتباط الأيوني:

يحصل هذا الارتباط بين ذرات عنصرين، تحتوي المدارات الخارجية لإحدى الذرات فائض بالالكترونات والأخرى نقص بالالكترونات ويتم تبادل الالكترونات لتصبح إحدى الذرات شاردة موجبة والأخرى شاردة سالبة لترتبطا بعضهما ببعض. ومثال على هذا الارتباط ما يحدث بين ذرتي الأكسجين والحديد ليتشكل أكسيد الحديد  $\text{FeO}$  والذي يتألف هيكله الشبكي من شوارد سالبة من الأكسجين وشوارد موجبة من الحديد حيث يوضح الشكل 1 - 11 الهيكل الشبكي لتوضع هذه الشوارد.



الشكل 1 - 11

الهيكل الشبكي لأكسيد الحديد  
 a - المخطط ، b - الشكل الفراغي

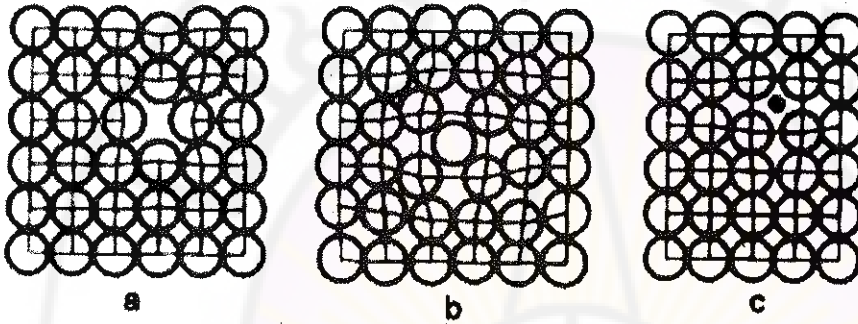
### 3.1 عيوب الهياكل الشبكية:

تختلف البنية الحقيقية للمادة عن البنية المثالية، حيث تحتوي البنية الحقيقية دائماً على عيوب. تنقسم عيوب الهياكل الشبكية إلى ثلاثة أقسام: نقطية وخطية وسطحية. تكون أبعاد العيوب النقطية قريبة من المسافة الذرية، أما العيوب الخطية فيكون طولها أكثر بكثير من مقطعها العرضي القريب من المسافة الذرية، بينما العيوب السطحية فتكون ذات سماكة قليلة وعرض وطول كبيرين.

#### 1.3.1 العيوب النقطية:

ينسب إلى هذا النوع من العيوب الفراغات في النسق الذري وتوضع ذرة بين الذرات ( ذرات تداخلية ) وكذلك وجود ذرة دخيلة بين الذرات الأساسية

( الشكل 1 - 12 ). ويسمى الفراغ بالعقد الفارغة للهيكل الشبكي. وتتكون الفراغات نتيجة لانتقال الذرات من أماكنها في عقد النسق الشبكي إلى سطح السبورة. وفي بعض الحالات تتكون الفراغات نتيجة لمغادرة الذرات أماكنها في عقد النسق الشبكي إلى أماكن بين الذرات (تداخلية). أما الذرات التداخلية فتتكون نتيجة لانتقال الذرات من عقد النسق الشبكي إلى الخلل الموجود بين عقد النسق. كما وتظهر العيوب التداخلية بسبب تأثير ذرات الشوائب.



الشكل 1 - 12

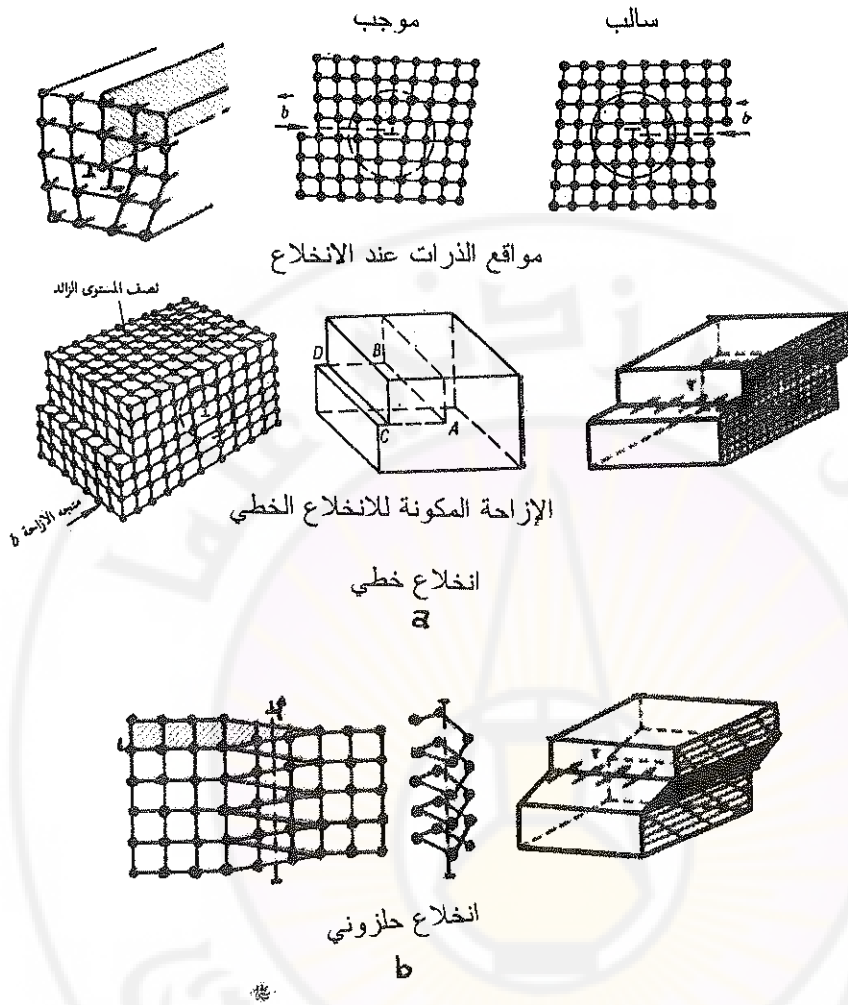
العيوب النقطية في النسق الشبكي

a - الفراغات، b - الذرات التداخلية، c - الشوائب

### 2.3.1 العيوب الخطية:

تسمى العيوب الخطية بالانخلاعات وهي إما انخلاعات خطية أو حلزونية. الانخلاع الخطي: هو عبارة عن تشوه في النسق الشبكي ناتج عن وجود نصف مستو زائد من الذرات ( الشكل 1 - 13 a )، والقص هو أبسط

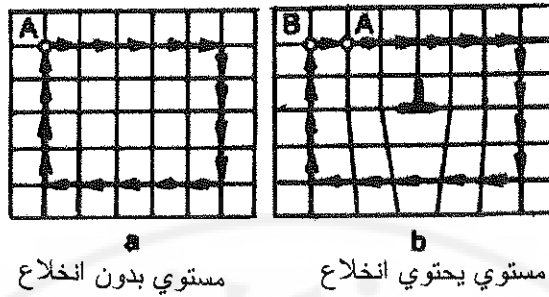
الطرق لتكوين الانخلاعات الخطية، فإذا قمنا بإزاحة جزء من البلورة بالنسبة للجزء الآخر بمقدار مسافة ذرية واحدة ثم توقفنا عند الوضع الذي تكون فيه الإزاحة قد تمت في الجزء ABCD من مستوي الانزلاق فيكون الخط AB هو الانخلاع في هذه الحالة ( الشكل 1 - 13 a ). وقد اصطلح على اعتبار الانخلاع موجباً  $+$  إذا كان نصف المستوي الذري الزائد يقع في الجزء العلوي من البلورة وسالباً  $-$  إذا وقع في الجزء السفلي من البلورة. وهذا الأمر اصطلاحي وتظهر أهميته عند تحليل التأثير المتبادل بين الانخلاعات. الانخلاع الحلزوني: هو انزلاق أحد جزئي البلورة بالنسبة للآخر ( الشكل 1 - 13 ). يستخدم لتمييز الانخلاعات وتحديد طريقة تسمى طريقة بورغر حيث يتم اختيار أحد المستويات الذرية ويرسم بدأً من إحدى الذرات مضلعاً مغلقاً بحيث تكون أضلاع هذا المضلع موازية لحروف الهياكل الشبكية ويكون عدد المسافات الذرية المأخوذة من الأعلى إلى الأسفل مساوياً لعددتها من الأسفل إلى الأعلى ومن اليمين إلى اليسار مساوياً للعدد من اليسار إلى اليمين، فإذا كان المستوي خالياً من الانخلاعات فإن المضلع المرسوم يصبح مغلقاً، أما إذا احتوى المستوي على انخلاع ما فإن إغلاق المضلع المرسوم يحتاج إلى شعاع  $\overline{AB}$  يسمى شعاع بورغر ( الشكل 1 - 14 ).



الشكل 1 - 13

مخطط الانخلاعات الخطية (a) والحلزونية (b)



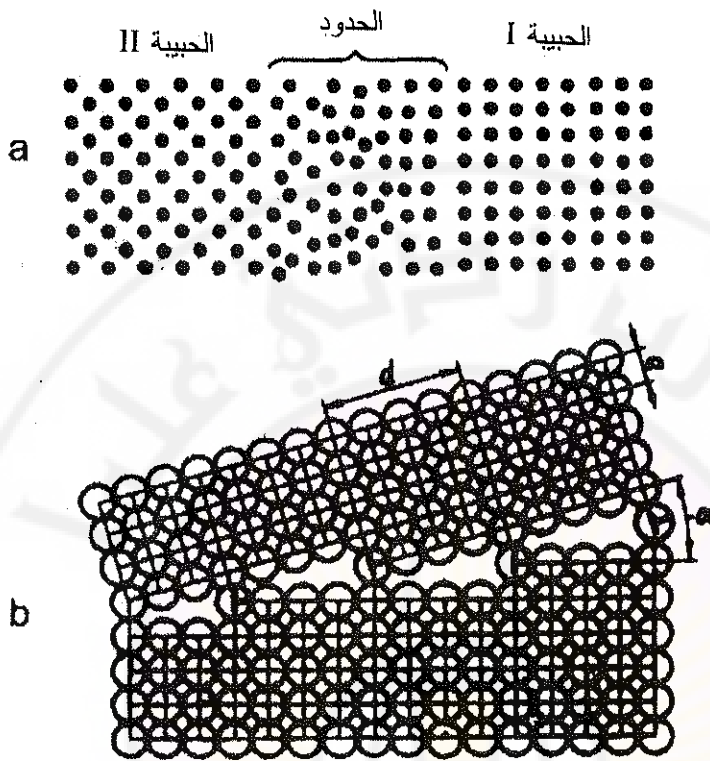


الشكل 1 - 14

تحديد شعاع بورغر  $\overline{AB}$

### 3.3.1 العيوب السطحية:

من أمثلة هذه العيوب السطوح الفاصلة بين الحبيبات المتجاورة، وإن أكثر العيوب السطحية أهمية هي الزوايا الكبيرة والزوايا الصغيرة وعيوب التوضع. وتعتبر الحدود الفاصلة بين الحبيبات مناطق انتقالية تتراوح سماكتها بين 5 و 10 مسافات ذرية وفيها ينتقل النسق الشبكي لإحدى الحبيبات والذي يتسم باتجاه معين إلى نسق شبكي آخر مختلف الاتجاه. وبالتالي فإن الذرات الموجودة في منطقة حدود الحبيبات تشغل مواقع أقل انتظاماً بالمقارنة بالذرات الموجودة في قلب الحبيبات ( الشكل 1 - 15 ). بالإضافة إلى ذلك فإن الشوائب الموجودة في المادة تتركز في منطقة حدود الحبيبات مما يزيد من مقدار الانحراف عن النظام الأمثل لترتيب الذرات. وتكون الانخلاعات الحدود الفاصلة بين اللقم داخل الحبيبات أو بين الحبيبات المتجاورة التي تتباين محاورها الرئيسية في الفراغ تبايناً طفيفاً ( حدود صغيرة الزوايا ).



الشكل 1 - 15

مخطط بنية حدود الحبيبات

a. حدود الزوايا الكبيرة

b. حدود الزوايا الصغيرة

## الفصل الثاني

### تبلور المادة

2 - 1 التبلور

2 - 2 آلية التبلور

2 - 3 التحولات الطورية للمعدن ( الالتروبية )

2 - 4 بنية المعادن المصبوبة



## تبلور المادة

### Crystallization Of Material

يكون الجسم في إحدى الحالات الثلاث ، صلب أو سائل أو غازي، وتتحول الأجسام من الحالة إلى أخرى باتجاه الحالة الأكثر استقراراً التي تتحدد بالطاقة الزائدة وتتحول المواد من الحالة ذات الطاقة الكبيرة إلى الحالة ذات الطاقة الأقل ذاتية، وبذلك فإن الحالة المستقرة هي الحالة التي تملك مقداراً أقل من الطاقة الزائدة.

#### 2 - 1 التبلور :

تسمى عملية انتقال المعدن من الحالة المنصهرة إلى الحالة الصلبة مع تشكيل بنية بلورية بالتبلور. ويحدث التبلور نتيجة انتقال المعدن إلى حالة أكثر اتزاناً من وجهة نظر ترموديناميكية وهي الحالة الصلبة التي تتميز بقدر أقل من الطاقة الحرة ( F ) وذلك طبقاً للقانون الثاني في الترموديناميك حيث أي عملية لا تحدث بصورة تلقائية طالما أنها غير مصحوبة بتناقص في مقدار الطاقة الحرة للمجموعة . والطاقة الحرة هي جزء من الطاقة الكلية للمادة ويؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى تناقص في الطاقة الحرة. فإذا حدث تحول للمادة دون

تغير في الحجم فإن الطاقة الحرة تكون مساوية

$$F = H - TS$$

حيث : H - الطاقة الكلية

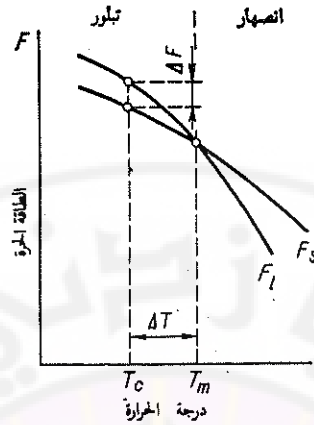
T - درجة الحرارة المطلقة

S - الأنتروبي

تتغير الطاقة الحرة هذه مع تغير درجة الحرارة وفق منحنى محدد ويبين ( الشكل 1-2 ) تغير مقدار الطاقة الحرة للمعدن المنصهر ( F<sub>l</sub> ) وللمعدن في

الحالة الصلبة ( $F_s$ ) مع تغير درجة الحرارة . وعند درجة حرارة الانصهار للمعدن ( $T_m$ ) يتساوى مقدار الطاقة الحرة للحالة السائلة مع مقدار الطاقة الحرة للحالة الصلبة، وهنا يمكن أن يتواجد المعدن في الحالتين المنصهرة والصلبة . أما عند درجة حرارة أعلى من ( $T_m$ ) تكون الطاقة الحرة للحالة الصلبة للمعدن أكبر من الطاقة الحرة للحالة السائلة وبالتالي فإن المعدن يتواجد بالحالة السائلة التي تملك طاقة حرة أقل. بينما يصبح المعدن صلباً عند درجات حرارة أقل من ( $T_m$ ) نظراً للطاقة الحرة الأقل للحالة الصلبة . وتستمر عملية التبلور طالما هناك فرق في الطاقة الحرة ( $\Delta F$ ) بين الحالة الصلبة والحالة السائلة بعبارة أخرى تحدث عملية التبلور فقط عند تبريد المعدن تحت درجة الحرارة ( $T_m$ ). ويسمى الفرق في درجات الحرارة بين درجة الحرارة ( $T_m$ ) ودرجة الحرارة ( $T_c$ ) التي تجري عندها عملية التبلور بفرط التبريد  $\Delta T = T_m - T_c$  .

تجري عملية تتبع تحولات المعدن من حالة إلى أخرى على منحنيات تبريد أو تسخين ترسم في إحداثيات درجة الحرارة - الزمن. ونرسم هذه المنحنيات بشكل تجريبي عن طريق استخدام مزدوجة حرارية وتسجيل درجة الحرارة مع الزمن (الشكل 2-2). فعند تسخين المعدن الصلب لدرجة حرارة معينة يبدأ المعدن بالانصهار، ونظراً لامتصاص المعدن للحرارة الكامنة للانصهار فإن درجة الحرارة تبقى ثابتة لفترة زمنية وبذلك يظهر على المنحني جزء أفقي ولا تعود درجة الحرارة إلى الارتفاع إلا بعد الانصهار الكامل. تحدث مثل هذه الحالة عند تبريد المعدن من الحالة السائلة ويظهر جزء أفقي عند درجة حرارة التجمد بسبب فقدان الحرارة بالتبريد تعوضه الحرارة الكامنة للتبلور، وعند انتهاء التجمد تنخفض درجة الحرارة تدريجياً. وتطبق درجة حرارة التبلور والانصهار بمنحنيات التبريد والتسخين عندما تكون عملية التحويل متوازنة .



الشكل ( 1 - 2 )

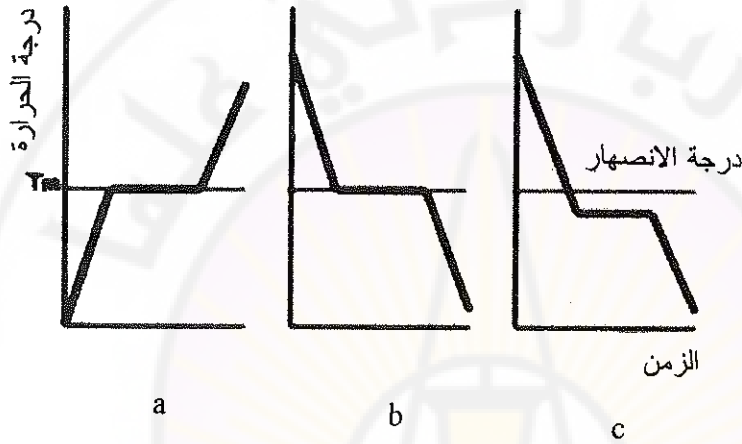
تغير الطاقة الحرة للمعدن بتغير درجة الحرارة

$F_L$  - للحالة السائلة

$F_S$  - للحالة الصلبة

يحدث التبلور عملياً عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة الانصهار وبالتالي يكون الجزء الأفقي أخفض من درجة الانصهار المتوازنة بقليل وتسمى هذه الظاهرة بفرط التبريد للمعدن السائل ( الشكل 2-2 c ) ويسمى الفرق بين درجتَي الحرارة بدرجة فرط التبريد. عند التجاوز الشديد للتبريد يظهر على منحنى التبريد انخفاض نتيجة الخروج المفاجئ للحرارة الكامنة للتبلور من المعدن. تؤثر سرعة التبريد على عملية التبلور في المعادن النقية ويظهر الشكل 2-3 بعض منحنيات التبريد بسرعات تبريد مختلفة. عند التبريد البطيء السرعة (  $v_1$  ) تكون درجة فرط التبريد صغيرة ويحدث التبلور عند

درجة حرارة قريبة من الدرجة الاتزانية ( $T_m$ ). وبتزايد سرعة التبريد تنمو درجة فرط التبريد (السرعات  $v_2, v_3$ ) وتحدث عملية التبلور عند درجات حرارة أقل بكثير من الدرجة ( $T_m$ ). وكما وتعتمد درجة فرط التبريد على طبيعة ودرجة نقاء المعدن وهي عادة لا تتعدى  $10 - 30\text{ C}^\circ$ .



الشكل 2 - 2

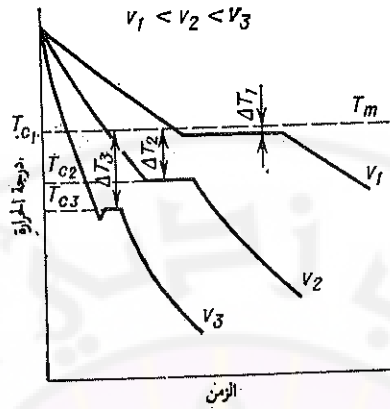
منحني التبريد والتسخين للمعدن النقي

a - منحنى التسخين

b - منحنى التبريد

c - فرط التبريد





الشكل 2 - 3  
تأثير سرعة التبريد على منحنيات التبريد  
 $v_1 < v_2 < v_3$

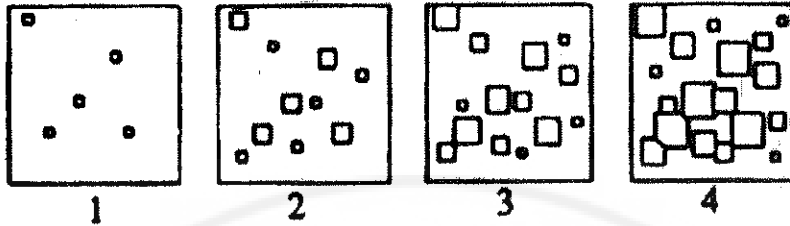
## 2 - 2 آلية التبلور :

يعتبر العالم الروسي تشيرنوف أول من توصل إلى أن عملية التبلور تتكون من عمليتين أساسيتين: تكون مراكز أو أنوية للتبلور، ونمو البلورات

حول هذه المراكز أو الأنوية، ويوضح الشكل 2 - 4 الرسم التخطيطي لهذه العمليات. فعند درجة حرارة التبلور يتكون في المعدن السائل مراكز تبلور مستقرة قادرة على النمو وتتجمع حولها الذرات مشكلة بلورات صغيرة بأشكال هندسية منتظمة. يؤدي نمو البلورات في جميع الاتجاهات إلى تصادمها وبالتالي إلى تشوه أشكالها الهندسية المنتظمة كنتيجة لصعوبة وصول السائل إلى أماكن تماس البلورات النامية وينتج عن ذلك أشكالاً هندسية غير منتظمة تسمى الحبيبات .

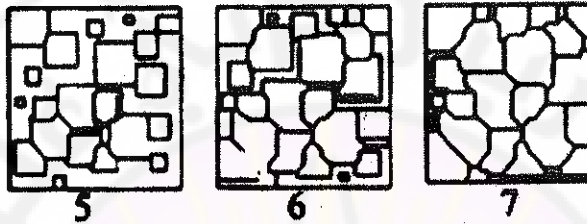
يتعلق حجم الحبيبات بمعدل تكون بذور التبلور وسرعة النمو وكلما ازداد معدل تكون بذور التبلور ونقصت سرعة نموها انخفض حجم الحبيبات. ويتغير نصف قطر حبيبات المعادن تحت ظروف مختلفة ضمن مجال  $0,001 - 0,4 \text{ mm}$ . يكون معدل تكون بذور التبلور صغيراً عند درجات فرط تسخين منخفضة (سرعات تبريد بطيئة) بينما تكون سرعة نمو البلورات كبيرة مما يؤدي إلى تكون بلورات كبيرة (حبيبات كبيرة). وعند زيادة درجة فرط التبريد يتزايد معدل تكون بذور التبلور بسرعة تفوق تزايد سرعة نمو البلورات مما يؤدي إلى تناقص حجم الحبيبات. ويؤثر حجم الحبيبات كثيراً على الخواص الميكانيكية للمعدن، فتزداد لدونة ولزوجة المعدن كلما كانت حبيبات المعدن أكثر دقة.

نمو بذور التبلور وظهور بذور تبلور جديدة



تصادم البلورات

شكل هندسي غير منتظم للبلورات



الشكل 2 - 4

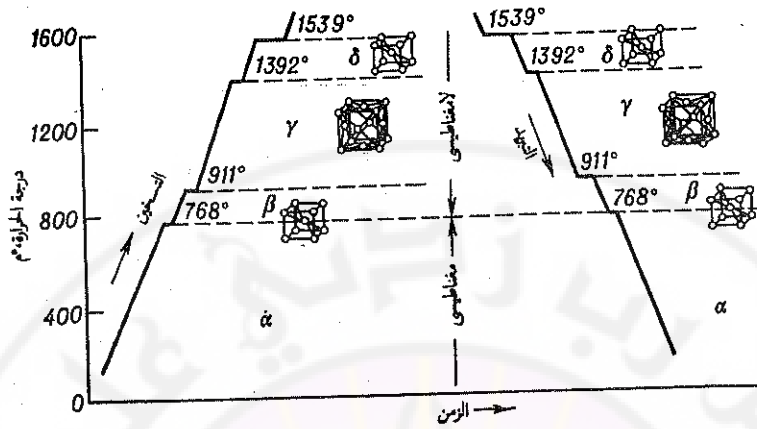
آلية التبلور

## 2 - 3 التحولات الطورية للمعدن ( الالتروبية ) :

تتميز بعض المعادن بإمكانية تواجدها في عدة أشكال للنسق البلوري يستقر كل منها في نطاق معين من درجات الحرارة. وتقوم الذرات نتيجة التحول الطوري بتغيير ترتيبها وتكون هيكلًا شبكيًا من نوع آخر وتسمى هذه الظاهرة بالالتروبية ( التآصلية أو تعدد الأشكال ). وقد جرت العادة على ترميز الحالة الطورية المتزنة في معظم المعادن عند درجات الحرارة الأكثر انخفاضاً بالرمز  $\alpha$  والرمز  $\beta$  للطور المتزن عند درجة حرارة أعلى والرمز  $\gamma$  عند درجات الحرارة الأكثر ارتفاعاً وهكذا. ويصحب التحول الطوري للمعدن من حالة إلى أخرى امتصاص للحرارة عند التسخين وإطلاق لهذه الحرارة الكامنة

عند التبريد وبالتالي يجري التحول عند درجة حرارة ثابتة. ويمثل التحول الطوري على منحنيات التحول الحراري بجزء أفقي. ويتم التحول الطوري بتكون مراكز للتبلور ونمو لاحق لهذه المراكز نتيجة لانتقال الذرات من التوضع القديم إلى التوضع الجديد. وغالباً ما تكون مراكز التبلور الطورية الجديدة على حدود حبيبات الحالة الطورية القديمة. وينتج عن عملية التحول تكون حبيبات بلورية جديدة بشكل وحجم مختلفين عن الحالة القديمة.

يبين الشكل 2-5 منحنى تبريد الحديد والذي يوضح التحولات الطورية في الحديد. يلاحظ توقف الحرارة أثناء التبريد عند درجة  $1535^{\circ}\text{C}$  ناتج عن التبلور من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة، ويتبلور الحديد على شكل مكعب متمركز حجمياً طول ضلع المكعب  $2.93 \text{ \AA}$  انغستروم ويسمى بالحديد  $\delta$  ( $\text{Fe}\delta$ ). وعند درجة حرارة  $1400^{\circ}\text{C}$  يتحول المكعب المتمركز حجمياً إلى مكعب متمركز وجهياً طول ضلعه  $3.65 \text{ \AA}$  ويشكل طوراً جديداً من الحديد يسمى حديد  $\gamma$  ( $\text{Fe}\gamma$ ). ويتحول الحديد عند درجة حرارة  $910^{\circ}\text{C}$  من المكعب المتمركز وجهياً (الحديد  $\gamma$ ) إلى المكعب المتمركز حجمياً من نوع حديد  $\alpha$  ( $\text{Fe}\alpha$ ) طول ضلع المكعب  $2.90 \text{ \AA}$ . بسبب تغير بناء الشبكة البلورية للحديد تغيراً لبعض صفاته، فالحديد  $\alpha$  يكاد لا يذيب الكربون، أما الحديد  $\gamma$  فيذيب الكربون حتى نسبة  $2.06\%$  أما الحديد  $\delta$  فيذيب الكربون بنسبة  $0.1\%$ .

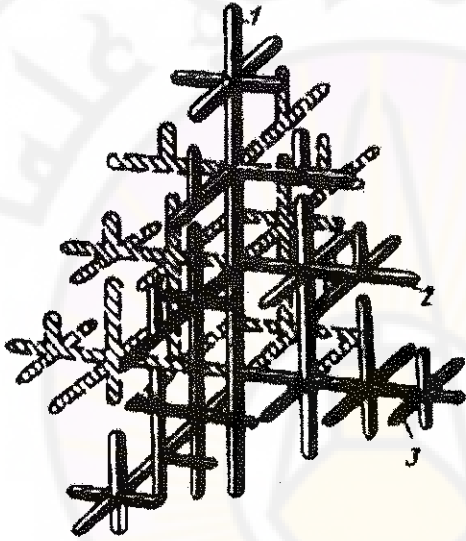


الشكل ( 2 - 5 )  
التحولات الطورية عند تبريد الحديد النقي

#### 2 - 4 بنية المعادن المصبوبة :

تختلف أشكال البلورات التي تتكون أثناء تجمد المعادن حسب سرعة التبريد وطبيعة وكمية الشوائب الموجودة بهذه المعادن، وغالباً ما تتخذ البلورات شكلاً متشعباً أو شجرياً يطلق عليه اسم البلورات الشجرية. الدندريت ( شكل 2 - 6 ). وعند تكون البلورات تنمو مراكز التبلور في اتجاه المستويات التي تتميز بأعلى كثافة لتوضع الذرات وبذلك تتكون في المعدن فروع طويلة تسمى بمحاور الرتبة الأولى ( 1 ). ويرافق نمو محاور الرتبة الأولى بتولد ونمو محاور جديدة تبدأ من حواف محاور الرتبة الأولى وتنمو عمودياً عليها وتسمى

محاور الرتبة الثانية ( 2 ). وتتولد على محاور الرتبة الثانية وتنمو محاور أخرى عمودية عليها تسمى بمحاور الرتبة الثالثة ( 3 ). وتنشأ نتيجة هذه العملية بلورات ذات صورة شجرية. ونتيجة تصادم وتلاحم الشجيرات يتشوه الشكل النهائي . وتصعب ملاحظة الشجيرات إذا امتلأت جميع ثناياها بالمعدن المتجمد .

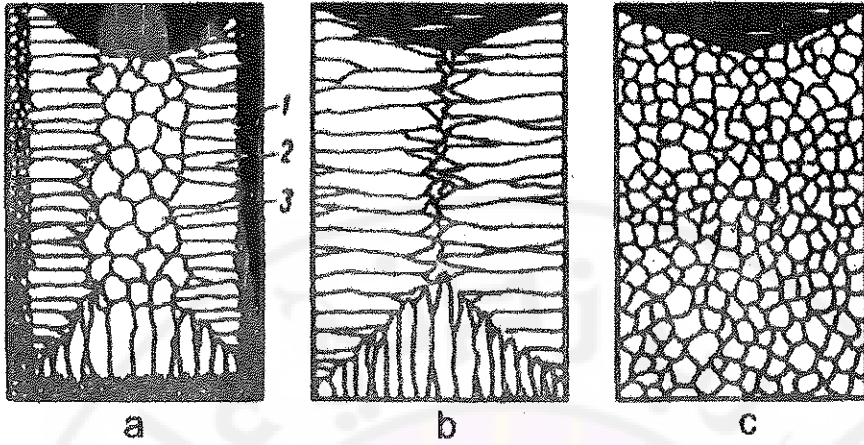


الشكل 2 - 6

البنية الشجرية للبلورات

يبدأ تبلور المعدن المصهور عند سطح القالب الذي يتسم بدرجة حرارة أقل، وينحصر تبلور المصهور في الفترة الزمنية الأولى في طبقة رقيقة جداً

ملاصقة لجدار القالب تكون درجة فرط التبريد فيها مرتفعة. وتؤدي السرعة المرتفعة للتبريد إلى تكون منطقة رقيقة جداً 1 من البلورات الناعمة ( الشكل 2 - 7 - a ) وتعقب المنطقة الأولى المنطقة 2 من البلورة الشجرية الممدودة وتنمو هذه البلورات في اتجاه انتقال الحرارة من المصهور إلى الوسط الخارجي أي عمودياً على جدران القالب. وتحتوي المنطقة 3 على بلورات متوازنة حيث لم يعد يوجد اتجاه محدد لانطلاق الحرارة لذا تنمو البلورات باتجاهات مختلفة حيث يلتقي بعضها ببعض وتشكل بلورات شبه منتظمة نمت بالاتجاهات الثلاثة بشكل متساوٍ تقريباً. ويمكن في حالة تسخين المصهور إلى درجة حرارة عالية جداً أو في حالة التبريد السريع جداً أو رفع درجة حرارة صب المصهور، أن تملأ البلورات الشجرية كل حجر القالب ( الشكل 2 - 7 - b )، أما في حالة تسخين المصهور إلى درجة حرارة غير عالية وحالة التبريد السريع سيمتلئ القالب ببلورات صغيرة ( الشكل 2 - 7 - c ).



الشكل 2 - 7  
بنية المصبوبات



### الفصل الثالث

#### السبائك المعدنية

- 3-1 تصنيف السبائك المعدنية الثنائية
- 3-2 أنواع النظم السبائكية
- 3-3 تركيب السبائك
- 3-4 قانون الطور ( قانون جبس الطوري )
- 3-5 مخططات التوازن للخلائط المعدنية الثنائية
- 3-6 قانون العتلة
- 3-7 أنواع مخططات التوازن
- 3-8 مخططات التوازن للخلائط التي تحدث فيها تغيرات التروبية



## السبائك المعدنية

### Alloys

إن المعادن النقية تكون عادة لينة جداً وضعيفة لذلك لا تصلح للعديد من الاستخدامات الصناعية ، كما أن مقاومتها للعوامل الكيميائية المحيطة في أغلب الأحيان ضعيفة مثل مقاومة التآكل corrosion resistance . ونتيجة لذلك يتم خلطها مع بعضها لتصنيع السبائك . إن مصطلح السبائك تعبير قديم استخدم للدلالة على خلط الفلزات النفيسة مع فلزات أقل قيمة بهدف تحسين عمليات التشكيل . تتكون معظم السبائك من عنصرين أو أكثر وتأخذ السبيكة اسم المعدن الأعلى تركيزاً والذي يعرف باسم المعدن الأساسي base metal ، بينما تعرف العناصر الأخرى المضافة بالعناصر السبائكية alloying elements .

تتمتع السبائك المعدنية بخواص جيدة وأهم هذه الخواص:

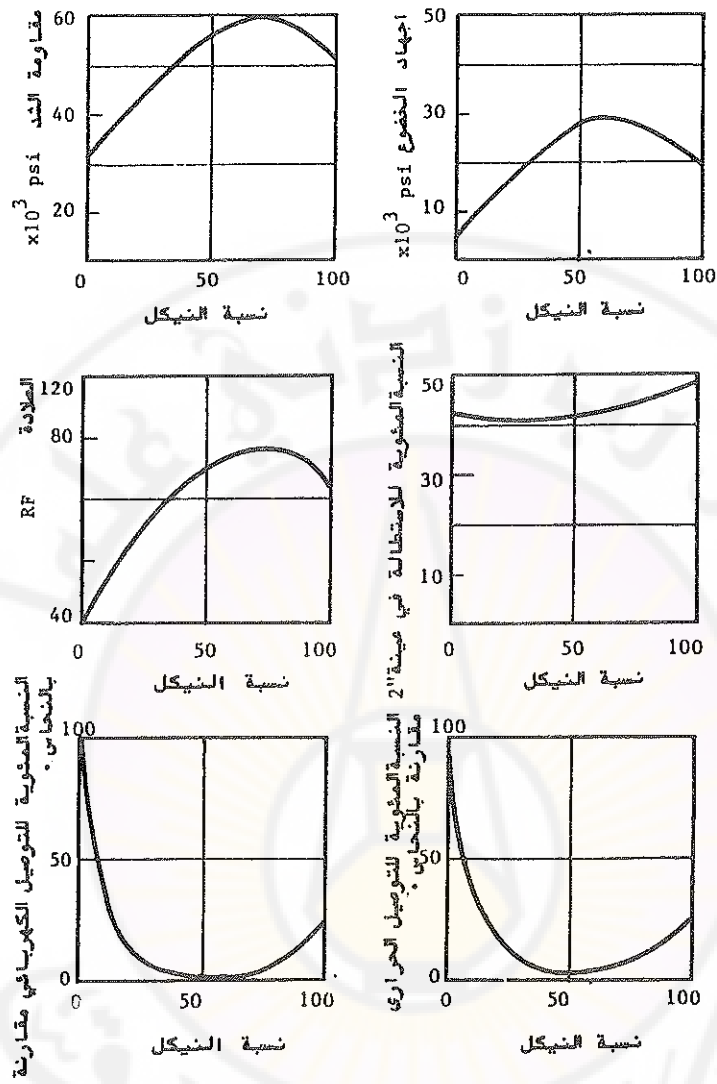
- 1- زيادة مقاومة التآكل فمثلاً عند إضافة نسبة بسيطة من الكروم أو النيكل إلى الحديد تزداد مقاومته بشكل كبير ضد التآكل .
- 2- زيادة متانة المعدن فنلاحظ أنه عند إضافة الكربون إلى الفولاذ تزداد قيم الإجهادات بالمقارنة مع الفولاذ النقي. كذلك إضافة النحاس إلى النيكل يؤثر بشكل واضح على الخواص الميكانيكية كما هو موضح في الجدول 1-3 والشكل 1-3.
- 3- تساعد على التحكم بالخواص الميكانيكية عن طريق المعالجات الحرارية، كما أنها تحسن الخواص الفيزيائية .

يحتوي النظام السبائكي alloying system على جميع السبائك التي يمكن أن تتكون بإذابة عدة عناصر مع بعضها في جميع التراكيز المحتملة و الممكنة. يطلق على السبيكة المكونة من عنصرين اسم سبيكة ثنائية binary alloy ، أما إذا كانت مكونة من ثلاثة عناصر فهي سبيكة ثلاثية ternary alloy . alloy

الجدول 1-3 تأثير إضافة الكربون على الخواص الميكانيكية للفولاذ\*:

| نسبة الكربون<br>C% | تضيق المقطع<br>$\psi\%$ | الاستطالة<br>$\delta\%$ | حد المتانة<br>$\sigma_{ut}[MPa]$ | حد الخضوع<br>$\sigma_y[MPa]$ | القساوة<br>HB |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------|
| 0.10               | 71                      | 47                      | 287                              | 126                          | 90            |
| 0.20               | 64                      | 37                      | 413                              | 252                          | 115           |
| 0.40               | 48                      | 30                      | 525                              | 308                          | 145           |
| 0.60               | 33                      | 23                      | 672                              | 343                          | 190           |
| 0.80               | 22                      | 15                      | 805                              | 364                          | 220           |
| 1.00               | 26                      | 22                      | 756                              | 364                          | 195           |
| 1.20               | 39                      | 24                      | 714                              | 357                          | 200           |
| 1.40               | 25                      | 19                      | 693                              | 350                          | 215           |

\*قيم الخواص المذكورة بعد تليدين الفولاذ



الشكل 1-3

تأثير إضافة النيكل على الخواص الميكانيكية والفيزيائية للنحاس

### 3 - 1 تصنيف السبائك المعدنية الثنائية : Classification of Binary Alloys

إن دراسة النظم السبائكية المبسطة توضح المفهوم الأساسي للنظم السبائكية الأكثر تعقيداً. يعتمد تصنيف نظم السبائك المعدنية الثنائية على التالي :

1. العناصر المكونة للسبيكة
2. تركيب البنية
3. نوع مخطط التوازن
4. طبيعة التركيب الفيزيائي physical composition

تلعب العناصر المكونة للسبيكة ونسب كل من هذه العناصر دوراً مهماً في خواص هذه السبيكة ، أما بالنسبة لتركيب البنية فإنه متشابه في معظم السبائك المعدنية .

### 3 - 2 أنواع النظم السبائكية :

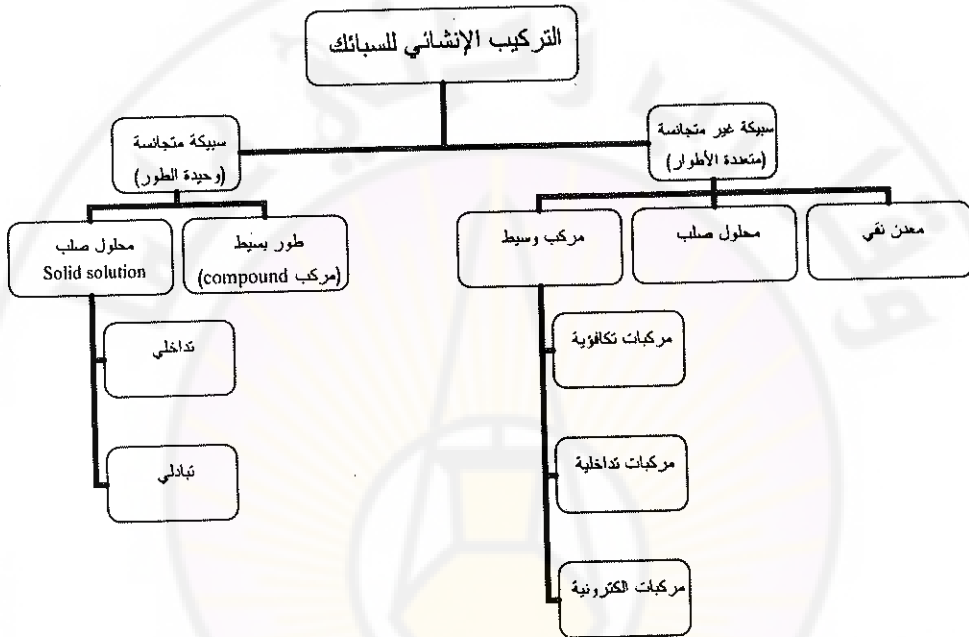
يوضح الشكل 3-2 الأنواع المختلفة للنظم السبائكية

أ - السبائك المتجانسة ( وحيدة الطور ) :

هي السبائك ( الخلائط ) متعددة البلورات وتتميز بالخواص التالية :

1. التركيب الكيميائي منتظم في جميع أجزائها فلا يوجد اختلاف في تركيز العناصر في الحبيبات المختلفة .
  2. وحيدة التركيب البلوري فلا يختلف من موقع إلى آخر .
- تتكون السبائك وحيدة الطور من المحاليل الصلبة التبادلية أو التداخلية . وتتمتع السبائك وحيدة الطور بالمزايا التالية :
- زيادة المقاومة والصلادة ، والسبب في ذلك أن ذرات العنصر المذاب تعوق حركة ذرات العنصر المذيب .

- انخفاض التوصيل الحراري والكهربائي ويعود السبب في ذلك إلى عدم انتظام المجال الكهربائي في بلورات السبيكة .



الشكل 2-3  
الأنواع المختلفة للنظم السبائكية

### ب - السبائك غير المتجانسة ( متعددة الأطوار ) :

تتكون السبيكة من عدة أطوار مختلفة عن بعضها من حيث البنية البلورية وكذلك تكون البنية المجهرية متباينة ، ويختلف التركيب الكيميائي من طور إلى آخر مجاور له. ، أي أن نسب العناصر المكونة للسبيكة تختلف بين طور وآخر. من أهم السبائك متعددة الأطوار سبائك الحديد وسبائك النحاس . تتميز السبائك متعددة الأطوار في الاستخدامات والتطبيقات الصناعية نظراً لقابليتها للمعالجات الحرارية ، وبذلك يمكن التحكم في خواصها الميكانيكية مثل الصلادة والمتانة والمرونة وغيرها والوصول بها إلى تحقيق الشروط المطلوبة، ويعتمد ذلك على :

1. التحكم في تركيب كل طور من أطوار السبيكة على حده .
2. تغيير النسب بين كميات الأطوار المكونة للسبيكة .

### ث - المحاليل الصلبة :

عند ذكر المحاليل الصلبة يتبادر مباشرة إلى الأذهان السوائل التي أذيت فيها بعض المواد الصلبة . إن المحاليل الصلبة عبارة عن خليطة معدنية تم صهرها ، فإذا كانت قابلة للذوبان مع بعضها البعض في الحالة الصلبة، ينتج عند تبريدها وتجمدها مركباً مكوناً من المادة المذيبة solvent وهي العنصر الذي تكون نسبته الأكبر في السبيكة ، ومن المادة المذابة solute وهي العنصر ذو التركيز الأقل . يبدو هذا المركب عند فحصه بالمجهر الضوئي كأنه معدن نقى ومن المستحيل التمييز بين أي من مركباته ولكن التحليل الطيفي يؤكد أنه مكون من عنصرين أو أكثر مذابة مع بعضها البعض .

تقسم المحاليل الصلبة إلى :



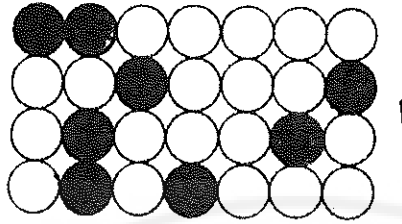
## 1 - المحاليل الصلبة التبادلية substitutional solid solution :

تحل ذرات المعدن المذاب محل ذرات العنصر المذيب وتتدخل في بناء الهيكل الشبكي . يكون إحلال الذرات في معظم سبائك المحاليل الصلبة بشكل غير منتظم ويدعى هذا بالمحلول الصلب التبادلي العشوائي andom sub. Solid solution (الشكل 3-3-أ) تزداد فرصة الإحلال العشوائي بزيادة درجة الحرارة .

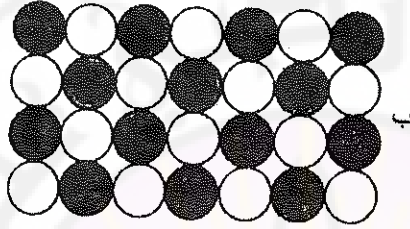
في حالات نادرة تتشكل محاليل صلبة منتظمة (الشكل 3-3-ب) ويعرف هذا المحلول باسم الشبكية المتفوقة superlattice . يحتمل وجود المحاليل الصلبة المنتظمة عند درجات الحرارة المنخفضة وتتميز هذه السبائك بصلادة عالية مع درجة من الهشاشة (التقص) brittleness . يمكن أن يكون الذوبان في المحاليل الصلبة التبادلية محدوداً كما في حالة سبائك الألومنيوم - نيكل . أو يكون الذوبان مطلقاً مثل سبائك النحاس - نيكل .

## 2- المحاليل الصلبة التداخلية interstitial solid solution :

وتعرف أحياناً بالمحاليل البينية حيث تتوضع ذرات العنصر المذاب في الفراغات بين ذرات المعدن الأساسي ( الشكل 3-4 ) لا يحدث هذا النوع من الذوبان إلا إذا كانت ذرات العنصر المذاب أصغر حجماً بكثير من حجم ذرات العنصر المذيب، حتى تتمكن من احتلال الفراغات بين الذرات. إن إمكانية تشكل هذه المحاليل تكون أكبر عندما يكون قطر الذرة المذابة أقل من 0.59 من حجم الذرات المذيبة. لقد وجد أن المعادن الانتقالية أكثر قابلية لتشكيل المحاليل الصلبة التداخلية من المعادن الأخرى. وأهم العناصر الانتقالية : الحديد، النيكل، الكروم، الفناديوم، المنغنيز، التتغنستن، الموليبدنيوم والتيتانيوم.



أ. محلول صلب تبادلي عشوائي

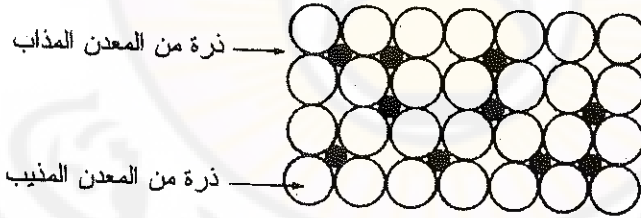


ب. محلول صلب تبادلي منتظم

الشكل 3-3

المحلول الصلب التبادلي

أ. عشوائي، ب. منتظم.



الشكل 4-3

المحلول الصلب التداخلي

أهم مثال على المحاليل الصلبة التداخلية، ذوبان الكربون في الحديد لتكوين محاليل صلبة مختلفة من الكرييدات والتي هي أساس صلادة الفولاذ. إن التغير في قابلية إذابة الكربون في الحديد يرتبط بتغير البنية البلورية من الهياكل الشبكية المكعبة حجمية التمرکز إلى وجهة التمرکز فنجذ أن أعلى نسبة لذوبان الكربون في حديد (  $Fe \alpha$  ) تساوي 0.02% عند درجة الحرارة  $723^{\circ}C$  ، بينما تصل نسبة ذوبان الكربون في حديد (  $Fe \gamma$  ) إلى 2.06 % عند درجة الحرارة  $1147^{\circ}C$  .

يمكن تقسيم المحاليل الصلبة حسب درجة الإشباع إلى :

(a) محلول غير مشبع unsaturated solution : تكون المادة المذابة أقل من الكمية التي يمكن إذابتها في المادة المذيبة عند درجة حرارة وضغط معينين.

(b) محلول مشبع saturated solution : وذلك عندما تكون كمية المادة المذابة هي الكمية الصحيحة التي يستطيع المذيب إذابتها.

(c) محلول متخم (فوق الإشباع) supersaturated solution: وهو إحدى حالات عدم التوازن وتكون كمية المادة المذابة أكثر مما يستطيع المذيب إذابتها تحت ظروف التوازن. لذلك يمكن الحصول على محلول متخم في ظروف خاصة مثل الإذابة عند درجات حرارة عالية ثم التبريد المفاجئ والسريع دون أن نترك المجال لحدوث عمليات الانتشار.

يعود إلى ما تقدم الفضل في إمكانية تصليد المعادن بواسطة المعالجة الحرارية والتحكم في خواصها الميكانيكية كما سنوضح ذلك لاحقاً.

### 3 - 3 تركيب السبائك :

يمكن التعبير عن تركيب السبائك إما بنسبة مئوية للوزن (نسبة مئوية وزنية wt%) أو بنسبة مئوية للذرات (نسبة مئوية ذرية at%). إن حدود الإذابة هي عدد الذرات التي يمكن أن تحل محل الذرات الأخرى أكثر من نسبة وزنية، ولكن في الاستخدامات الهندسية يتم التعبير عن تكوين السبائك وتركيبها بنسبة وزن كل عنصر إلى وزن السبيكة الكلية. لذلك من الضروري معرفة العلاقة بين النسبة المئوية الوزنية والنسبة المئوية الذرية، وكيف يتم التحويل بينهما.

1. إذا كان معنا النسبة المئوية الوزنية لعنصرين، يمكننا تحديد النسبة المئوية الذرية للعنصر الأول من العلاقة التالية:

$$(at\%)_1 = \frac{\left(\frac{wt\%}{AtomicWeight}\right)_1}{\left(\frac{wt\%}{AtomicWeight}\right)_1 + \left(\frac{wt\%}{AtomicWeight}\right)_2} \times 100$$

حيث: at% - النسبة المئوية الذرية للعنصر

wt% - النسبة المئوية الوزنية للعنصر

Atomic Weight - الوزن الذري للعنصر

1, 2 - العنصر الأول والثاني

والنسبة المئوية الذرية للعنصر الثاني:

$$(at\%)_2 = \frac{\left(\frac{wt\%}{AtomicWeight}\right)_2}{\left(\frac{wt\%}{AtomicWeight}\right)_1 + \left(\frac{wt\%}{AtomicWeight}\right)_2} \times 100$$

2. يتم التحويل من النسبة المئوية الذرية إلى النسبة المئوية الوزنية للعنصر الأول من العلاقة التالية:

$$(wt\%)_1 = \frac{[(at\%) \times (AtomicWeight)]_1}{[(at\%) \times (AtomicWeight)]_1 + [(at\%) \times (AtomicWeight)]_2}$$

والنسبة المئوية الوزنية للعنصر الثاني:

$$(wt\%)_2 = \frac{[(at\%) \times (AtomicWeight)]_2}{[(at\%) \times (AtomicWeight)]_1 + [(at\%) \times (AtomicWeight)]_2}$$

### 3 - 4 قانون الطور ( قانون جيبس الطوري ):

لقد تم بحث حالة التوازن وتم التأكيد على أن البنية تكون في حالة توازن عندما تكون قدرتها الداخلية أو القدرة الحرة فيها أصغر ما يمكن وكلما تناقصت هذه القدرة كلما اقتربت المجموعة من حالة التوازن. لذلك يتعلق وضع توازن مجموعة بعدة عوامل هي:

1. مكونات المجموعة وعددها.

2. درجة الحرارة والضغط

بناءً على ذلك يمكننا حساب عدد تلك العوامل التي يمكن أن تتغير دون أن تؤثر على حالة التوازن للجملة، وبالتالي نحصل على رقم يُدعى درجة الحرية  $F$  ويحسب من المعادلة:

$$F = m - P + 2$$

حيث أن:  $m$  - عدد المكونات أو العناصر التي تتكون منها المجموعة؛

$P$  - عدد الأطوار؛

### F- درجة الحرية

أما الرقم 2 فإنه يدل على درجة الحرارة والضغط الذين يمكن أن يتبدلا، ولكن بما أن دراستنا للمعدن تقتصر على الحالتين السائلة والصلبة لذلك لن يكون هناك تأثير للضغط ويمكن إهماله وبالتالي تصبح المعادلة السابقة بالشكل التالي:

$$F = m - P + 1$$

على سبيل المثال: إن المعدن النقي عند درجة تجمده عبارة عن مجموعة ذات مكونة واحدة (  $m = 1$  ) وتشمل على طورين (سائل ومعدن متجمد )، وتكون درجة الحرية في هذه الحالة:

$$F = 1 - 2 + 1 = 0$$

وهذا يعني أن الطورين السائل والصلب موجودين في حالة توازن فقط عند درجة حرارة الانصهار ( أو التجمد ) ولن تتغير درجة الحرارة هذه حتى يختفي أحد الطورين نهائياً من مجموعة التوازن. أما إذا كان المعدن في الحالة السائلة ( أو الصلبة ) أي المجموعة مؤلفة من طور واحد فإن عدد درجات الحرية يكون:

$$F = 1 - 1 + 1 = 1$$

أي أنه يمكن تغيير درجة الحرارة دون أن نسبب أي تغيير في حالة المجموعة.

### 3 - 5 مخططات التوازن للخلائط المعدنية الثنائية :

حتى نتمكن من فهم النظام السبائكي والتغيرات التي تحدث أثناء تبريد السبيكة من درجة حرارة الانصهار إلى درجة حرارة الجو العادية ودراسة التغيرات التي تطرأ على هذا النظام يجب الاستعانة بما يسمى مخططات التوازن equilibrium diagrams

يمكن تعريف مخطط التوازن بأنه رسم بياني يبين العلاقة بين النسبة المئوية لمكونات السبيكة في نظام سبائكي معين ودرجة الحرارة مع بيان الأطوار المتكونة في هذا النظام. من خلال مخططات التوازن يمكننا التعرف على ما يلي:

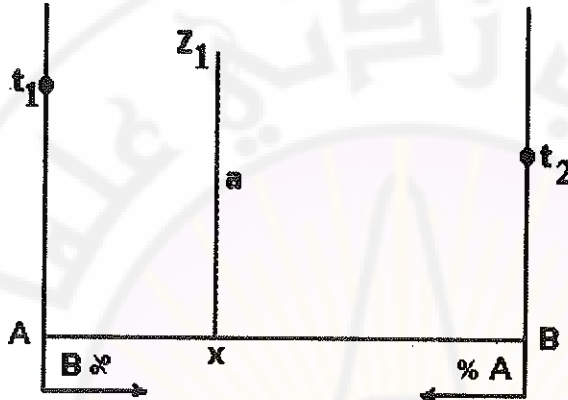
1. التغيرات التي تحدث للبنية أثناء تسخين أو تبريد السبيكة
  2. إمكانية معالجة هذه السبائك حرارياً والتحكم في خواصها الميكانيكية
  3. تدل بشكل غير مباشر على خواص المادة والتي تعتمد بشكل كبير على عدد الأطوار المكونة للخليطة وكمية هذه الأطوار ونوعيتها، وتغير الظروف بتغير هذه الكميات.
- إن مخططات التوازن في الحالة المثالية تعبر عن علاقة الأطوار مع بعضها تحت ظروف التوازن، وهذا يعني أن الظروف التالية لا تتغير مع الزمن. ويمكن الوصول إلى حالة التوازن من خلال التسخين والتبريد البطيئين للغاية. ولذلك لكي يحدث تغير في الطور فلا بد من إعطاء الطور الجديد المتكون فترة زمنية كافية. وعندما يجري التسخين أو التبريد بمعدل سريع فإن ذلك يؤدي إلى تغيرات مختلفة عن تلك التي تحدث عادة تحت ظروف التوازن أو قد يعيقها، كما أنه يؤدي إلى حدوث تشوهات في المادة.

#### طريقة إنشاء مخطط التوازن:

يعتمد المبدأ الأساسي في إنشاء مخططات التوازن الثنائية على التجربة العملية، وذلك كما يلي:

تمثل القطعة المستقيمة الأفقية AB في الشكل 3-6 محور التركيز حيث تمثل النقطة A البنية النقية للمعدن A أي تحوي % 100 من المعدن A .

تزداد نسبة المعدن B اعتباراً من النقطة A التي تحوي 0% من المعدن B حتى تصبح هذه النسبة 100 % في النقطة B ومن الطبيعي أن تتناقص نسبة المعدن A حتى تصبح في النهاية 0 % في النقطة B. يمثل كل من الخطين الشاقوليين  $At_1$  و  $Bt_2$  محاور درجات الحرارة.

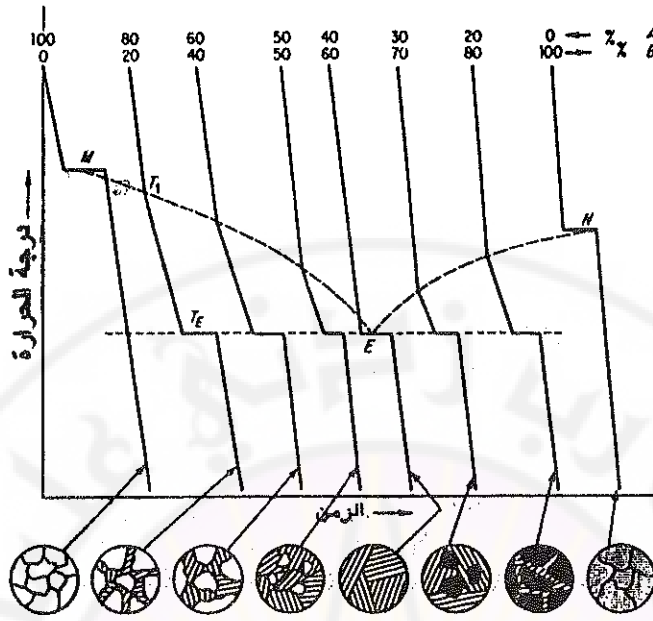


الشكل 6-3

إنشاء مخططات التوازن الثنائية

إذا قمنا بتبريد مجموعة من العينات التي تحوي على خليط من معدنيين مختلفة التركيز ودرسنا مراحل تبريد كل عينة فإننا نتمكن من إنشاء مخطط التوازن ( الشكل 7-3 )، حيث تظهر على كل منحنى تبريد نقاط تحدد بداية التحولات من الطور السائل إلى الحالة الصلبة، كما وتحدد نهاية هذه التحولات.





الشكل 7-3

الطريقة التجريبية لإنشاء مخطط التوازن باستخدام منحنيات التبريد

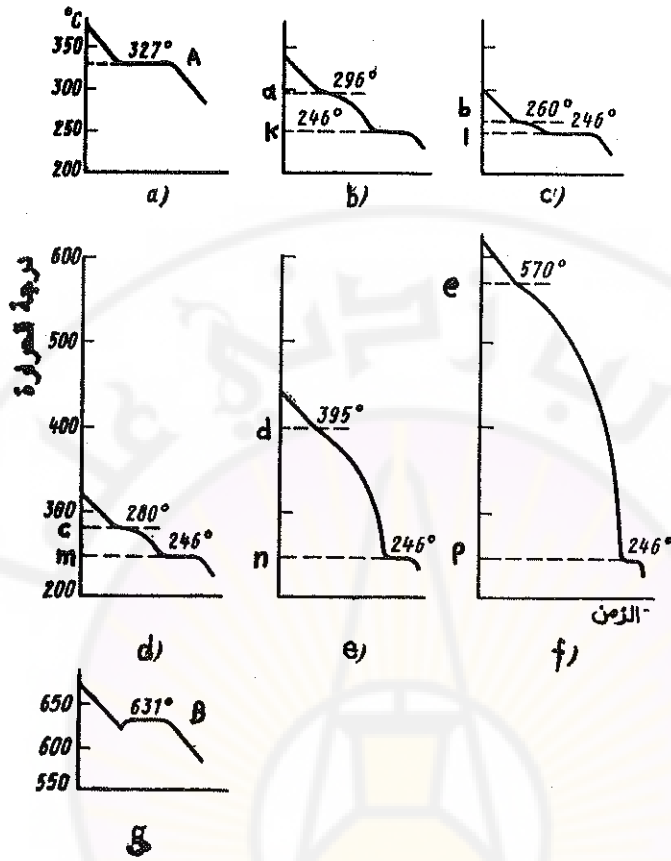
كما هو معروف عند تبريد المعدن النقي يظهر في منحنى التبريد خطاً أفقياً عند نقطة التجمد ( العينة الأولى والعينة الأخيرة )، وهذا يعني أن التحول من الطور السائل إلى الطور الصلب يتم عند درجة حرارة ثابتة. عند إضافة المعدن B إلى المعدن A ( كما هو واضح في بقية العينات ) تنخفض درجة حرارة بداية التحول ويتغير منحنى التبريد حسب قانون الطور (قانون جيبس). بوصل نقاط بداية التحول مع بعضها نحصل على خط الانصهار والمتمثل بالمنحنى AEB. وبوصل نقاط نهاية التحول نحصل على خط التجمد (

ADEFB ) الذي تتضح فيه النقطة E المميزة (نقطة اليوتكتيك ) الشكل 3-8. إن كلمة يوتكتيك تعود إلى المصطلح اليوناني eutectos وتعني المركب سهل الانصهار، وهي نقطة تقاطع خطي الانصهار، كما أنها النقطة الوحيدة التي تقع على خط الانصهار وبنفس الوقت على خط التجمد، ولذلك تمثل نقطة اليوتكتيك اصغر درجة حرارة انصهار في السبيكة، وتعتبر هذه النقطة في غاية الأهمية. مثال على ذلك مخطط التوازن للرصاص والأنتيمون الشكل 3-8 والشكل 3-9. إن الذي يحدد شكل مخطط التوازن في السبائك الثنائية مجموعة من

العوامل هي:

أ - قابلية عناصر السبيكة للانحلال ببعضها في الحالة السائلة، ومن الملاحظ أن معظم السبائك المعدنية تتحل ببعضها بشكل مطلق في هذه الحالة السائلة.

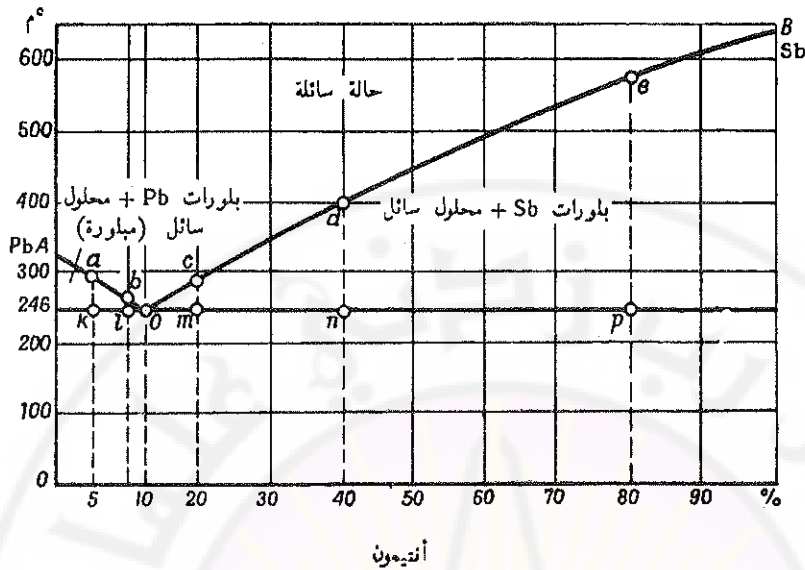
ب - قابلية عناصر السبيكة للانحلال ببعضها في الحالة الصلبة  
ج - قابلية عناصر السبيكة للاتحاد مع بعضها وتشكيل مركباً كيميائياً  
أو معدنياً، ومدى قابلية هذه المركبات لإحلال أحد عناصر السبيكة أو الانحلال فيه.



| g   | f  | e  | d  | c  | b  | a   |                |
|-----|----|----|----|----|----|-----|----------------|
| 0   | 20 | 60 | 80 | 90 | 95 | 100 | % Pb الرصاص    |
| 100 | 80 | 40 | 20 | 10 | 5  | 0   | % Sb الأنتيمون |

الشكل 8-3

دراسة تجريبية لمنحنيات تبريد الرصاص والأنتيمون



الشكل 3-9

### إنشاء مخطط التوازن من منحنيات التبريد السابقة

### 3 - 6 قانون العتلة:

بالإضافة إلى أن مخطط التوازن يحدد تركيب ومواقع الأطوار وأنواع البنية المتواجدة في كل منطقة من مناطقه فإنه يساعدنا على معرفة كمية هذه الأطوار والبنيات وذلك باستخدام ما يسمى بقانون العتلة.

لنبحث الآن نظام خليطة مكونة من الطورين M و N كمية كل منهما p و q مجهولة ( الشكل 3-10 ). تركيب كل من الطورين وكذلك تركيب الخليطة يوضحه مقدار تركيز المكون B كما يلي:

$$x_1 = \text{نسبة المكون B في الطور M} ;$$

$$x_2 = \text{نسبة المكون B في الطور N} ;$$

$x$  = متوسط نسبة المكون B المتواجد في الخليطة المكونة من الطورين M و N . إذا اعتبرنا أن مجموع كتلتي الطورين هي:

$$p + q = 1$$

فنجد من الشكل أن مقدار المكون B في هذه الخليطة سيكون:

$$x = p * x_1 + q * x_2$$

$$q = 1 - p$$

$$p * x_1 + (1 - p) * x_2 = x$$

$$p = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}$$

$$q = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

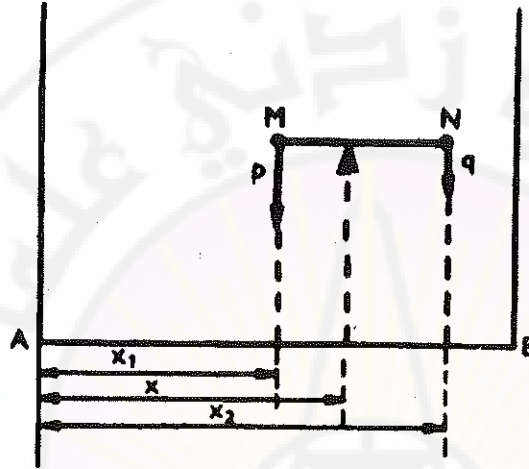
إذا قمنا بتوضيح هذه المعدلات بشكل نسبة يكون:

$$\frac{p}{q} = \frac{(x_2 - x) \cdot (x_2 - x_1)}{(x_2 - x_1) \cdot (x - x_1)} = \frac{x_2 - x}{x - x_1}$$

تتطابق هذه المعادلة مع مبدأ عزم الرافعة في قوانين الميكانيك. وقد اعتبرت عند حساب قيم p , q أن كمية الخليطة تساوي الواحد. ولكن إذا كانت الكمية تساوي مقدراً وليكن Q فإننا نحتاج عند ذلك أن نحدد كمية p , q بالاستناد إلى المقدار Q :

$$p = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \cdot 100[\%]$$

$$q = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \cdot 100[\%]$$



الشكل 10-3

حساب قانون العتلة

سنوضح مثلاً محدداً لتطبيق قانون العتلة عند دراسة مخطط التوازن الموضح بالشكل 11-3 لخليطة من الرصاص والانتيموان. نقوم بتبريد الخليطة  $Z_1$  من درجة حرارة الانصهار. ضمن المجال الحراري الواقع بين النقطتين 1 و2 تتكون الخليطة من بلورات المعدن Sb ومن السائل المنصهر الذي يتغير تركيبه حسب المنحني E-1. عند النقطة a ستتكون الخليطة من بلورات Sb

النقسية أي بتركيز النقطة c ، ومن السائل المنصهر بتركيز النقطة b . يمكننا توضيح كل منهما حسب قانون العتلة كما يلي:

$$Sb = \frac{\overline{ab}}{bc} \cdot 100[\%]$$

$$L = \frac{\overline{ac}}{bc} \cdot 100[\%]$$

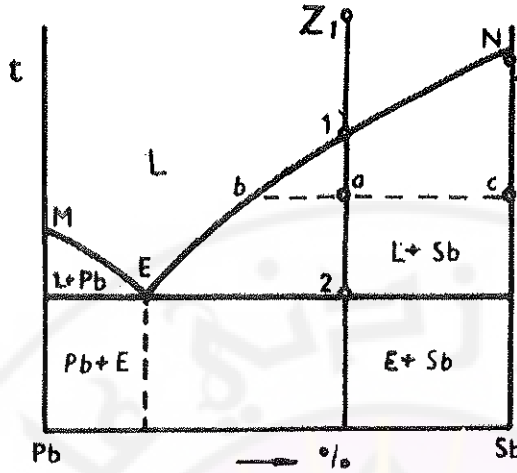
ولتطبيق قانون الطور نحسب درجة الحرية في النقاط التي تحدث فيها التحولات الطورية وهي النقطة 1 والنقطة 2 . وبما أن التركيز ثابت ( يساوي  $Z_1$  ) والمتبدل إذاً هو درجة الحرارة فقط. في النقطة 1 يكون عدد المكونات  $m = 2$  ( هما  $Sb$  ,  $Pb$  ) وعدد الأطوار  $P = 2$  هما الطور السائل والطور الصلب فباستخدام قانون الطور نجد:

$$F = 2 - 2 + 1 = 1$$

وهذا يعني أن التحول يحدث ضمن مجال حراري. في النقطة 2 يكون عدد المكونات  $m = 2$  ( هما  $Sb$  ,  $Pb$  ) وعدد الأطوار  $P = 3$  هم الطوران السائلان والطور الصلب فباستخدام قانون الطور نجد:

$$F = 2 - 3 + 1 = 0$$

إذاً درجة الحرية تساوي الصفر ويحدث التحول عند درجة حرارة ثابتة.



الشكل 3-11

تطبيق قانون العتلة عند دراسة مخطط التوازن لخليطة من الرصاص والأنتموان

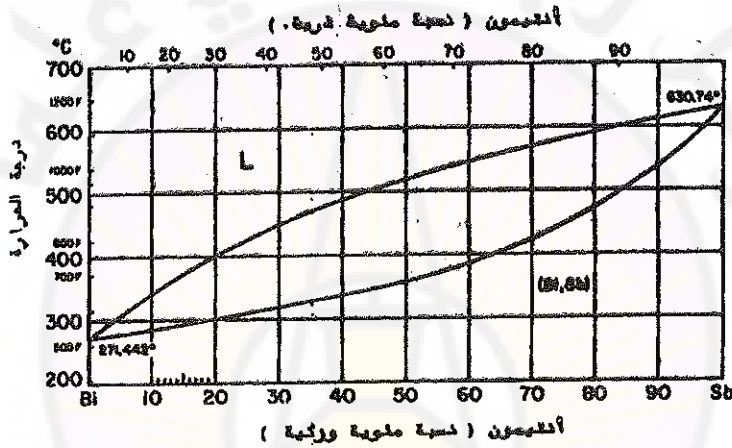
### 7-3 أنواع مخططات التوازن:

لنبحث الآن مجموعات العناصر القابلة للانحلال مع بعضها بشكل مطلق في الحالة السائلة، أما في الحالة الصلبة فإنها تكون بأحد الأشكال التالية:

**1. المجموعة الأولى:** وهي التي تتكون من معدنين قابليين للانحلال مع بعضها في الحالة الصلبة بشكل مطلق وتشكل هذه المجموعة ما يسمى المحاليل الصلبة Solid Solution مثال ذلك (النحاس - النيكل)، (الذهب - الفضة)، (الذهب - الرصاص)، (الحديد - النيكل) (الحديد - الكوبالت) وغيرها. توضح الأشكال (3-12 و 3-13) نموذجاً لهذه الأنواع من المخططات.



إن العامل الأساسي في تركيب البنية والتركيب الكيميائي لأي سبيكة عند تبريدها من حالة الانصهار إلى حالة التجمد هو سرعة التبريد. إذا كان معدل التبريد بطيئاً جداً، فسوف يكون التركيب في هذه الحالة متوازناً. أما التبريد السريع فإنه سوف يؤدي إلى حالة عدم التوازن.

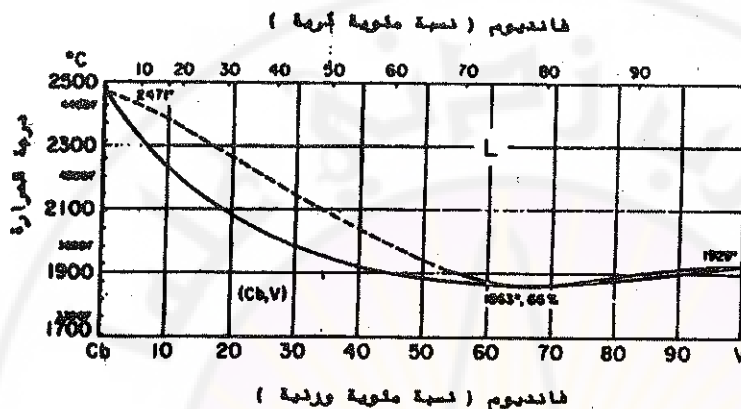


الشكل 12-3

مخطط التوازن بزموت - أنتموان

من الملاحظ أن هناك حالات خاصة لهذا النوع من المخططات حيث أن المخطط يحتوي على نهاية عظمى أو نهاية صغرى حيث يلتقي في هذه

النقطة خط السيولة وخط التجمد. مثال ذلك مخطط التوازن للنيوبوم - فاناديوم  
الشكل 3-13.



الشكل 3-13

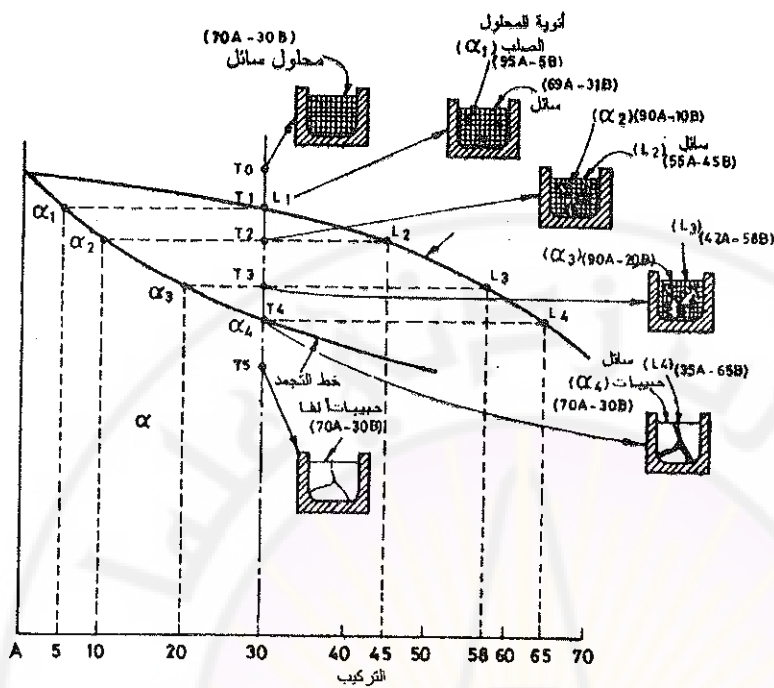
مخطط التوازن نيوبيوم - فاناديوم

عند استعراض التبريد البطيء جداً تحت ظروف التوازن لسبيكة محددة  
تحتوي مثلاً 70% من العنصر A و 30% من العنصر B (الشكل 3-14)  
ونقوم بدراسة التغيرات الطورية أثناء التبريد ثم تعمم هذه الحالة على كل  
مخططات التوازن.

تتكون السبيكة عند درجة الحرارة  $T_0$  من الطور السائل المنصهر  
المتجانس، عند تبريدها إلى درجة الحرارة  $T_1$  الواقعة على خط الانصهار، تبدأ

السبيكة بالتجمد حيث تتشكل أولى أنوية المحلول الصلب  $\alpha_1$  وتكون غنية بالمعدن الذي درجة حرارة انصهاره أعلى. تبعاً لذلك يتناقص تركيز المعدن A في المحلول السائل المتبقي ويزداد تركيز المعدن B فيه. باستمرار التبريد حتى درجة الحرارة  $T_2$  يصبح تركيز السائل  $L_2$  ويتكون الصلب من  $\alpha_2$  تحيط بالمحلول الصلب  $\alpha_1$  وهكذا حتى نهاية التبلور. للوصول إلى حالة التوازن وتجانس كامل البنية في المحلول الصلب لابد من حدوث عملية انتشار ذرات العنصر B ، وهذا يحتاج إلى الوقت الكافي، لذلك لابد أن يكون معدل سرعة التبريد بطيئاً جداً وبذلك يصبح المحلول الصلب النهائي متجانساً وتركيبه في أية نقطة مكون من 70%A و 30% B .

التبريد غير المتوازن: إن الواقع العملي يحول دون تبلور السبائك المعدنية تحت ظروف التوازن، لأن عملية الانتشار في الحالة الصلبة بطيئة نسبياً والتبريد البطيء جداً غير عملي وغير اقتصادي في الصناعة. ونتيجة للتبريد العادي كما هو الحال عند عمليات السكب فإن تركيب المحلول الصلب سوف يبتعد عن ظروف التوازن وتتشكل بنية نهائية غير متجانسة تدعى البنية القلبية core structure أو الانعزال الدندريتي، حيث يتكون الجزء الداخلي من المعدن الذي درجة حرارة انصهاره عالية ويحاط بقشرة خارجية من المعدن الذي درجة حرارة انصهاره منخفضة. إن زيادة معدل سرعة التبريد يؤدي إلى زيادة مدى تركيب السبيكة الصلبة وزيادة عدم تجانسها ( الشكل 3-15 ).  
نلاحظ نتيجة لذلك بأنه:



الشكل 3-14

دراسة التغيرات في تركيب البنية عند التبريد البطيء

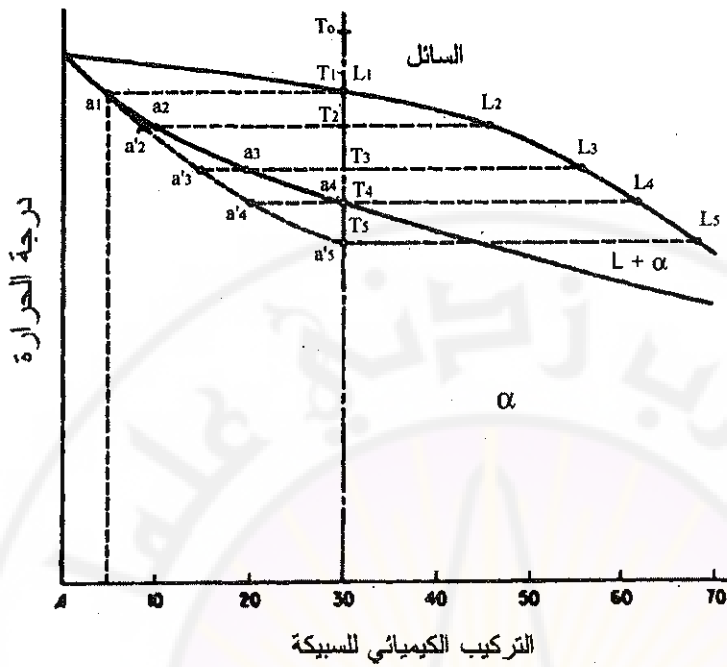
- 1- يستمر التجمد النهائي عند درجات حرارة أقل من درجات الحرارة المتوقعة من مخطط التوازن.
- 2- يرتفع تركيز المعدن الذي درجة حرارة انصهاره منخفضة في السبيكة مقارنة بالمحلول الناتج عن التبريد البطيء.

3- يوجد اختلاف واضح في التركيب الكيميائي بين مركز المسبوكة ووسطها.

إن البنية غير المتجانسة و الناتجة عن التبريد غير المتوازن يؤدي إلى تركيز المعدن منخفض درجة حرارة الانصهار على حدود الحبيبات وبذلك يشكل نقطة ضعف في السبيكة، ويؤدي إلى عدم انتظام الخواص الميكانيكية في كامل المادة وتزداد حساسية السبيكة للتآكل على حدود الحبيبات. لكل هذه الأسباب نجد أن العديد من المنشآت الصناعية ترفض استخدام المواد ذات التركيب القلبي، لذلك تعتمد على التغلب على هذه المشكلة بإجراء نوع من المعالجة الحرارية يدعى الإحماء الانتشاري homogenization ( سيتم بحثها لاحقاً ).

2. المجموعة الثانية: المعدنان غير قابلين للانحلال مع بعضهما في الحالة الصلبة ولا يشكلان أي مركب كيميائي، وبالتالي ينفصل كل عنصر بمفرده عند التبريد والتحول من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة ويتشكل المزيج الميكانيكي، ويحدث عندهما التفاعل اليوتكتيكي، ويطلق عليه اسم النظام اليوتكتيكي Eutectic System .

لقد مر معنا سابقاً المثال العملي لهذا النوع من المخططات من خلال الدراسة التجريبية لسبائك الأنتمون والرصاص. نلاحظ من الشكل بأن هذا المخطط مكون من أربعة مناطق وهي:



الشكل 3-15

تأثير التبريد السريع على بنية المحلول الصلب

المنطقة الأولى الواقعة فوق خط الانصهار AEB مكونة من طور واحد هو الطور السائل المنصهر المتجانس لأن المعدنين قابلان للذوبان مع بعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة.

المنطقتان الثانية والثالثة محصورتان بين خط الانصهار AEB وخط التجمد ADEFB تفصل بينهما نقطة اليوتكتيك E . تحوي المنطقة الواقعة على يسار النقطة E على الطور السائل وعلى بلورات المعدن A النقية ( في

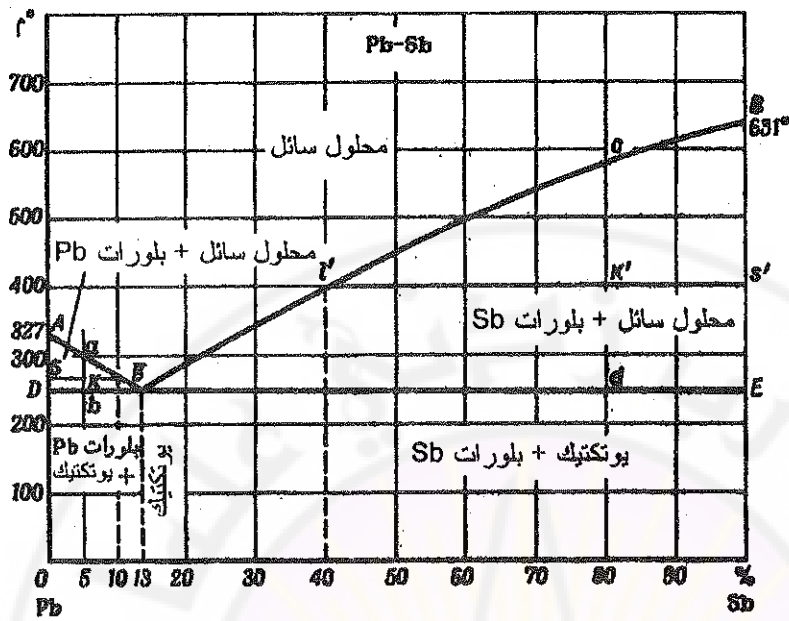
مثالنا بلورات الرصاص ). وتحتوي المنطقة الواقعة على يمين النقطة E على الطور السائل وبلورات المعدن B النقية ( هنا بلورات الأنتيموان ).

المنطقة الرابعة وهي المنطقة الواقعة تحت خط التجمد وتكون البنية فيها قد تبلورت وأصبحت جامدة بكاملها، وبما أن المعدنين غير قابلين للذوبان مع بعضهما في الحالة الصلبة، لذلك يتشكل المزيج الميكانيكي وهو عبارة عن خليط غير متجانس من المعدنين النقيين. ونميز هنا ثلاثة أشكال من هذا الخليط هي:

الخليط اليوتكتيكي: يتشكل عند تركيز نقطة اليوتكتيك E ويتحول كامل الطور السائل عند درجة حرارة ثابتة. تحوي كل بلورة على خليط غير متجانس بشكل رقائق متعاقبة من المعدنين. طبيعة التحول اليوتكتيكي أنه يكون بشكل صفائحي (lamellar)، يمكنه في بعض الأحيان أن يتبلور بشكل كروي.

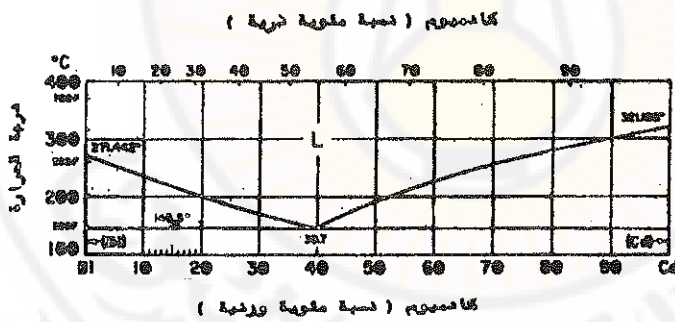
الخليط دون اليوتكتيكي hypoeutectic : هي السبيكة الواقعة على يسار نقطة اليوتكتيك وتحتوي كمية من بلورات المعدن A النقية والباقي من بلورات اليوتكتيك. يمكن حساب نسبة كل من مكونات السبيكة باستخدام قانون العتلة.

الخليط فوق اليوتكتيكي hypereutectic : وهي السبيكة الواقعة على يمين نقطة اليوتكتيك وتحتوي كمية من بلورات المعدن B وبلورات اليوتكتيك. يختلف تركيز نقطة اليوتكتيك من سبيكة إلى سبيكة أخرى، فنلاحظ على سبيل المثال أنه عند سبائك (الرصاص - الأنتيموان) تكون نقطة اليوتكتيك عند التركيز 13% Sb (الشكل 3-16). بينما نجدها عند سبائك (البزموت - كاديوم) تكون عند التركيز 39.7 % Cd كما يوضحه الشكل 3-17 .



الشكل 16-3

مخطط التوازن الرصاص - الأنتيمون



الشكل 17-3

مخطط التوازن للزئبق - كاديوم



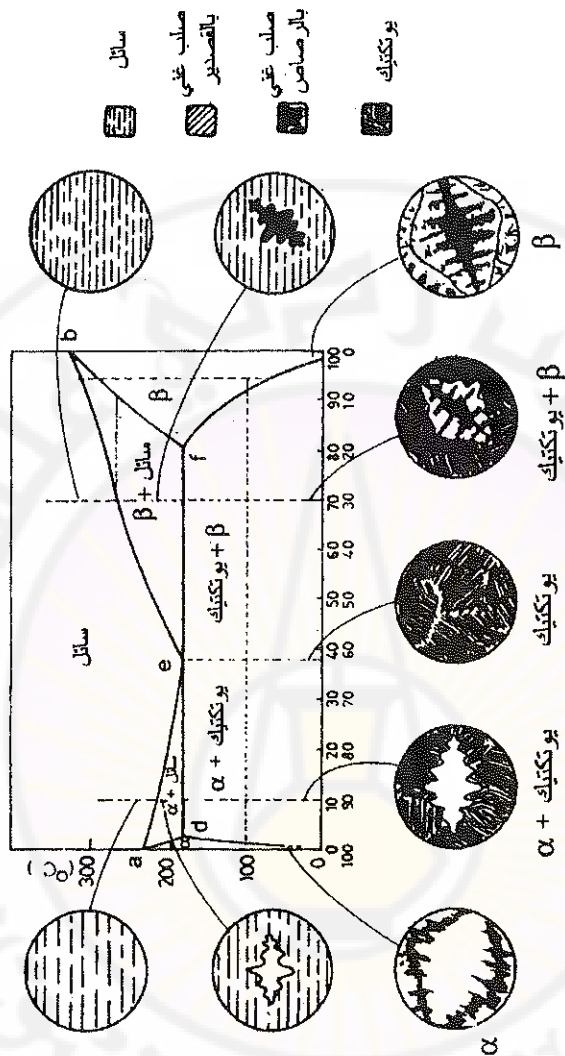
### 3. المجموعة الثالثة: المعدنان قابلان للانحلال مع بعضهما بشكل

مطلق في الحالة السائلة وبشكل محدود في الحالة الصلبة، حيث ينفصل جزء من العنصر بشكل منفرد، وبذلك يتكون لدينا محلول صلب محدود. نميز ضمن هذه المجموعة نوعين من مخططات التوازن:

أ - النوع الأول إذا كانت درجات حرارة انصهار المعدنين متقاربة يتشكل تفاعل يوتكتيكي جزئي. يعتبر هذا النوع من أهم مخططات التوازن لأن معظم المعادن تظهر قابلية للذوبان المحدود مع بعضها البعض في الحالة الصلبة، يوضح الشكل 3-18 مخطط التوازن بشكل عام لهذا النوع من النظم السبائكية.

نلاحظ من المخطط أن الخط ( aeb ) يمثل خط الانصهار، أما الخط ( adef ) فهو خط التجمد. تمثل النقطتان a و b نقطتي انصهار المعدنين A و B كما تمثل النقطة e نقطة اليوتكتيك. تتميز هذه الأنواع من مخططات التوازن بقابليتها لتشكيل مقادير محددة من المحاليل المعدنية الصلبة.

عندما نقوم بتبريد عينة من هذه السبيكة تبريداً بطيئاً ولتكن على سبيل المثال سبيكة تحوي 15% من المركب B ( الشكل 3-19 ) ونقوم بدراسة مراحل تبريدها اعتباراً من درجة الحرارة الواقعة فوق خط الانصهار، حيث تكون السبيكة بشكل سائل منصهر متجانس. نلاحظ أن التجمد يبدأ تحت خط الانصهار مباشرة عند درجة الحرارة  $T_2$  حيث تبدأ بلورات المحلول الصلب  $\alpha$  بالانفصال ومع استمرار التبريد تستمر عملية التبلور حتى تتجمد السبيكة بكاملها عند درجة الحرارة  $T_5$  والجسم الصلب المتشكل هو عبارة عن المحلول الصلب المتجانس ألفا ( وهو مكون من المعدن المذيب A الذي أذاب كمية من المعدن B ، نسبتها في مثالنا 15% ). عند النقطة M يكون المحلول غير مشبع.

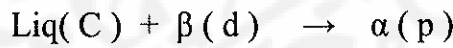


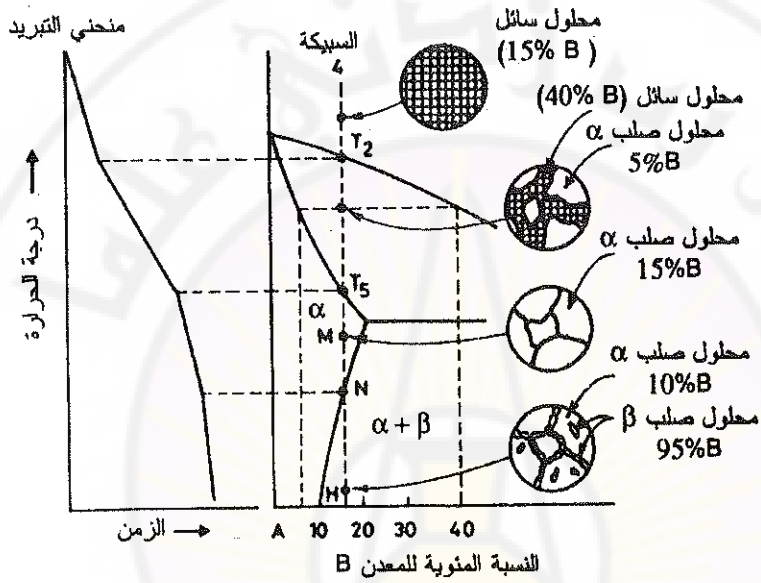
الشكل 3-18  
المخطط العام لمنحنى التوازن

بانخفاض درجات الحرارة تتخفض قابلية ذوبان المعدن B في المعدن A ، لذلك عند تبريد العينة إلى درجة حرارة أقل من النقطة N يصبح المحلول الصلب  $\alpha$  فوق المشبع بالمعدن B وعند التبريد البطيء فإن الكمية الفائضة من المعدن B تترسب خارجة من المحلول الصلب، ونظراً لأن المعدن A قابل للذوبان في B لذلك لا يترسب المعدن B بشكل نقى، وإنما يتم ذلك بشكل محلول صلب  $\beta$ . نتيجة لذلك تتكون السبيكة عند درجة حرارة الغرفة من المحلول الصلب ألفا إضافة إلى كمية قليلة من المحلول الصلب بيتا المترسبة على حدود حبيبات ألفا. يستفاد من ظاهرة الترسيب على حدود الحبيبات بالتحكم في الخواص الميكانيكية للسبيكة من خلال المعالجات الحرارية.

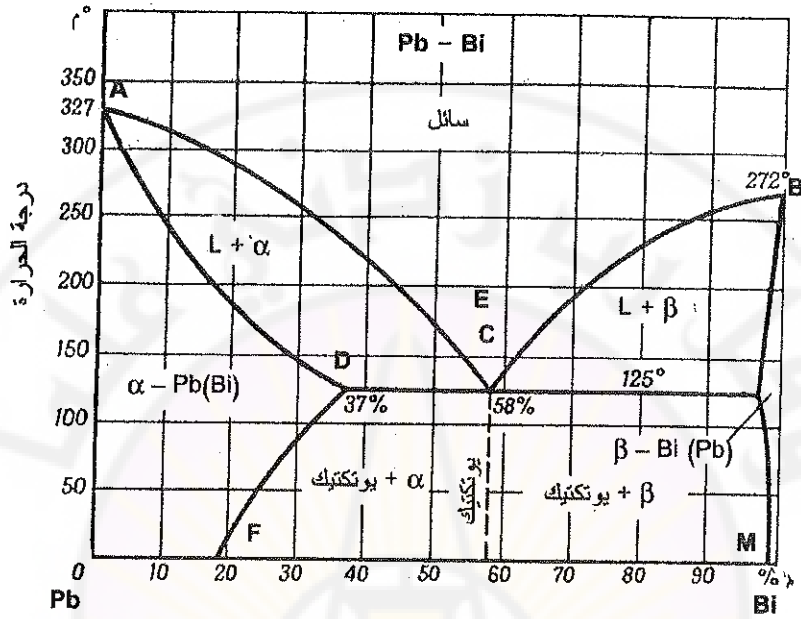
من الأمثلة الحقيقية لهذه المخططات سبائك الرصاص - الزموت كما هو موضح في الشكل 3-20 .

ب - النوع الثاني إذا كانت درجات حرارة انصهار المعدنين متباعدة فإننا نحصل على ما يسمى نظام السبائك البريتكتيكية ( Peritectic Alloys System ). ويحدث التفاعل البريتكتيكي Peritectic Reaction. يحدث التفاعل البريتكتيكي أثناء تبلور بعض أنواع من السبائك حيث يحدث تفاعل بين الطور السائل المنصهر والبلورات الأولية التي انفصلت لتوها منه مكوناً محلولاً صلباً جديداً أو مركباً معدنياً متداخلاً ويؤدي هذا التفاعل إلى اختفاء أحد الطورين أو كليهما ونشوء طور صلب جديد ويتم التفاعل البريتكتيكي عند درجة حرارة ثابتة كما هو موضح بالعلاقة التالية:





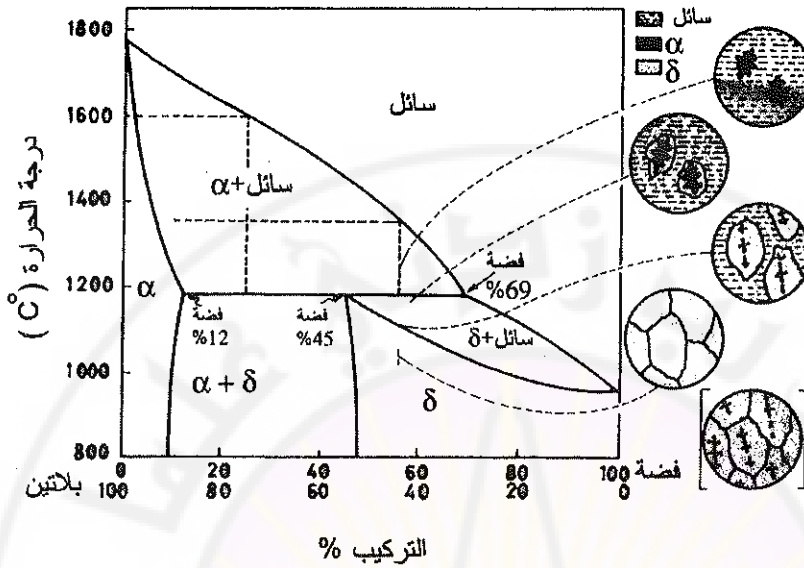
الشكل 19-3  
مراحل تبريد عينة



الشكل 20-3

مخطط التوازن لسبائك الرصاص - البزموت

لقد جاء اسم بريكتيك من الكلمة اليونانية peri وتعني حول أو محيط، وهذا يعني أن الطور الجديد المتكون يحيط بالطور القديم ويغلفه بقشرة خارجية تعزله وتوق أي تفاعلات أخرى ماعدا التخلل البطيء جداً. نجد هذا النوع من المخططات عند سبائك الفضة والبلاتين الموضح في الشكل 21-3 .



الشكل 3-21

مخطط التوازن لسبائك الفضة - البلاتين

#### 4. المجموعة الرابعة: المعدنان قابلان للانحلال بشكل مطلق في الحالة

السائلة و غير قابلين للانحلال مع بعضهما في الحالة الصلبة. وكذلك نميز هنا نوعين من المخططات هما:

أ - المعدنان يتحدان مع بعضهما ويشكلان مركباً كيميائياً مستقراً (ينصهر عند درجة حرارة ثابتة):

يوضح الشكل 3-22 مخطط التوازن لعنصرين يشكلان مركباً كيميائياً وحيداً مستقراً هو  $(A_mB_n)$  لا ينحل فيه في الحالة السائلة أي من العنصرين

A و B . نلاحظ أن هذا المركب يقسم المخطط إلى قسمين: القسم الواقع على يساره مكون من المركب A والمركب الكيميائي  $A_mB_n$  ، والقسم الواقع على اليمين مكون من المركب B والمركب الكيميائي  $A_mB_n$  ويحتوي كل قسم على نقطة يوتكتيك. نلاحظ من المخطط أن المركب الكيميائي يتبلور عند درجة حرارة ثابتة وأنه يحتوي على نقطتي اليوتكتيك  $E_1$  ,  $E_2$  والبنية الطورية لهما هي:

$$E_1 = (A + A_mB_n)$$

$$E_2 = (B + A_mB_n)$$

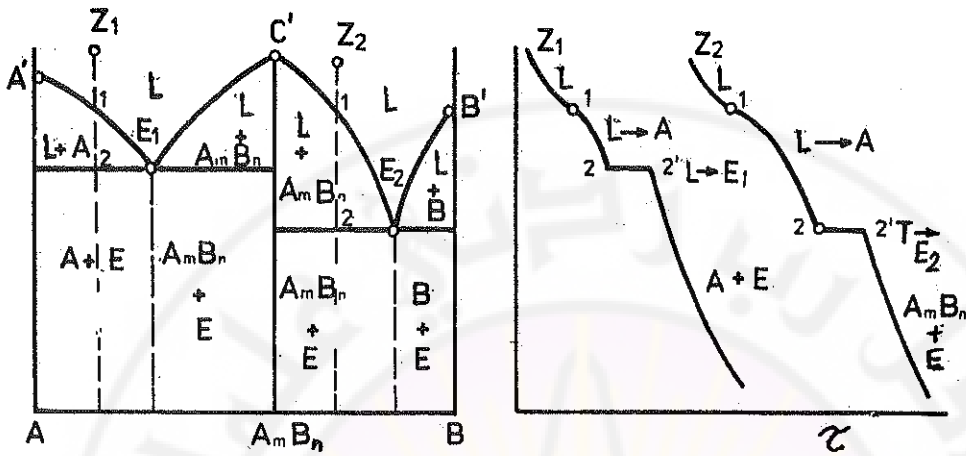
( منحنيات التبريد في الشكل 3-22 هي للعينات  $Z_1$  ,  $Z_2$  ).

يوضح الشكل 3-23 حالة خاصة من المركبات الكيميائية المستقرة  $A_mB_n$  حيث يمكن أن يتشكل كمية محدودة من المحلول الصلب ( يتشكل المركب الكيميائي  $A_mB_n$  الذي يحل كمية محدودة من المركب A والمركب B ). تبدأ عملية التبلور للمركبات  $A - A_mB_n$  عند درجات الحرارة الموافقة لخط الانصهار (  $A'E_1C'$  ). يبدأ عند تبريد الخليطة من درجة حرارة الانصهار حتى تلاقي الخط  $A'E_1$  تبلور المحلول الصلب  $\alpha$  الذي قاعدته العنصر A . كما يتكون عل الخط  $E_1C'$  المحلول الصلب  $\gamma$  وقاعدته المركب  $A_mB_n$  . ويمثل الخط  $A'aE_1bC'$  منحنى نهاية التبلور. يبدأ التبلور في الجزء الثاني من المخطط عند المنحنى  $C'E_2B'$  . ويتبلور ضمن المجال الواقع على يسار نقطة اليوتكتيك  $E_2$  المحلول الصلب  $\gamma$  ويتبلور على يمين  $E_2$  المحلول الصلب  $\beta$  وقاعدته العنصر B . وتكون البنية اليوتكتيكية في هذه الخلائط مكونة من:

$$E_1 = (\alpha + \gamma)$$

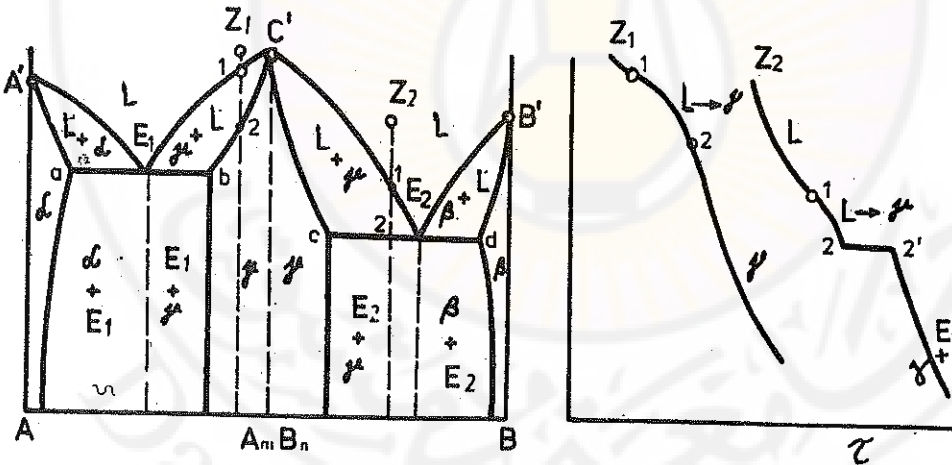
$$E_2 = (\beta + \gamma)$$

( منحنيات التبريد في الشكل 3-23 هي للعينات  $Z_1$  ,  $Z_2$  ).



الشكل 22-3

مخطط التوازن لعنصرين يشكلان مركباً كيميائياً وحيداً مستقراً



الشكل 23-3

حالة خاصة من المركبات الكيميائية المستقرة



ب - المعدنان يتحدان مع بعضهما ويشكلان مركباً كيميائياً غير مستقر  
( لا ينصهر عند درجة حرارة ثابتة ):

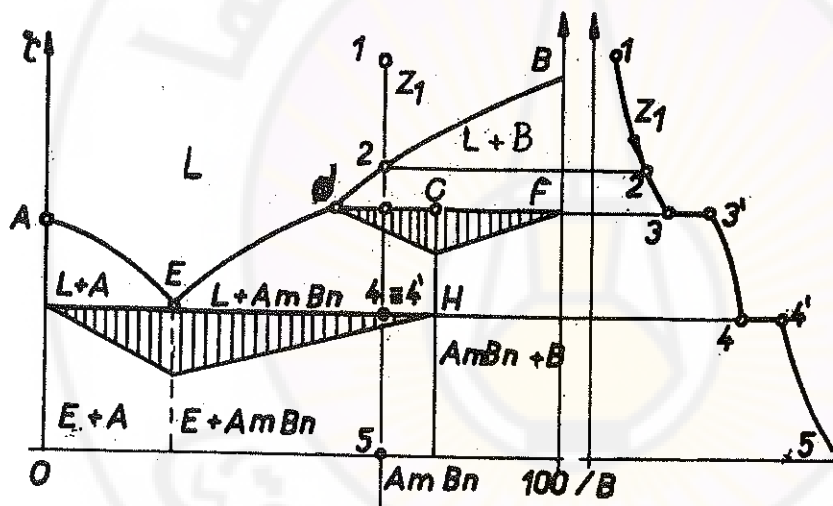
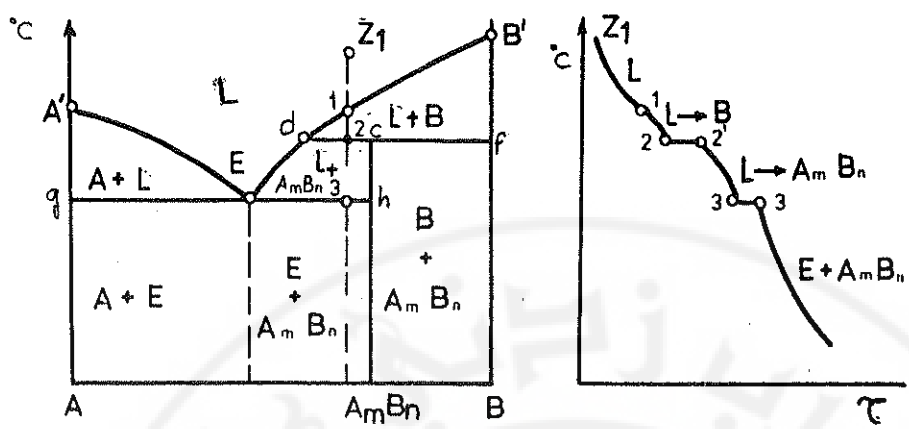
يختلف هذا النوع من المخططات عن السابقة بأن العنصرين A, B يشكلان مركباً كيميائياً  $A_mB_n$  يمكنه أن ينصهر عند التسخين قبل انصهار الخليطة بالكامل وبالتالي نجد أنه ضمن مجال حراري محدد يتواجد السائل وبلورات أحد العنصرين ( العنصر B والسائل كما في الشكل 3-24 ) حسب المعادلة:



يوضح الرمز x أن جزءاً من السائل فقط يتحول. ويوضح الشكل 3-24 مئخني التبريد للعينه  $Z_1$  حيث تتكون الخليطة عند درجات حرارة أعلى من النقطة 1 من سائل منصهر متجانس، وتبدأ بلورات المعدن B النقية بالانفصال في النقطة 1 الواقعة على خط الانصهار B'E. يتكون عند النقطة 2 الواقعة على الخط dcf المركب الكيميائي غير المستقر  $A_mB_n$  عند درجة حرارة ثابتة وذلك من تحول للطور B وقسماً من السائل المنصهر ( تفاعل بريكتيكي ). بعد انتهاء التفاعل البريكتيكي وباستمرار التبريد تتبلور الكمية الباقية من السائل بشكل مركب كيميائي  $A_mB_n$  حتى درجة الحرارة عند النقطة 3 حيث يصبح تركيز السائل مساوياً لتركيز النقطة اليوتكتيكية E ويحدث التفاعل اليوتكتيكي لبقية السائل ويتكون اليوتكتيك:

$$E = ( A + A_mB_n )$$

أدرج على الشكل 3-24 مثلث تاومان Taumann ( المثلثات المهشرة ) الذي يوضح نسبة التحول اليوتكتيكي على خط اليوتكتيك، ويوضح على الخط dcf المقدار الذي تبلور بشكل مركب كيميائي.



الشكل 24-3

مخطط التوازن لعنصرين يشكلان مركباً كيميائياً غير مستقر

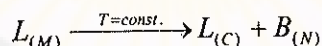
## 5. المجموعة الخامسة: تمثل هذه المجموعة مخططات التوازن

للعناصر القابلة للانحلال مع بعضها جزئياً أو غير قابلة للانحلال في الحالة السائلة.

أ- المعدنان قابلان للانحلال مع بعضهما في الحالة السائلة بشكل محدود وينشأ هنا ما يسمى بالتفاعل المونوتكتيكي.

يوضح الشكل 3-25 حالة يكون فيها العنصران A , B قابلان للذوبان مع بعضهما بشكل محدود في الحالة السائلة، يمثل الخط المتقطع في الشكل الانحلال الجزئي للعنصرين في الحالة السائلة ويظهر أنه بازدياد درجات الحرارة تزداد قابلية الانحلال حتى تصل إلى حالة الذوبان المطلق فوق خط الانحلال الأعظمي. يعتبر الخط 'A'ECMB' خط بداية التبلور والخط 'aEb' خط نهاية التبلور. تتكون الخليطة في أية نقطة واقعة فوق المنحني CKM من طور واحد عبارة عن محلول سائل، وتحت هذا الخط تتكون الخليطة من طورين سائلين هما  $L_1$  ,  $L_2$  أحدهما المحلول السائل للعنصر B في A والثاني المحلول السائل للعنصر A في B .

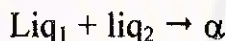
يمثل الخط LMN خط التحول المونوتكتيكي، من خصائص التفاعل المونوتكتيكي أنه عندما يكون تركيز المحلول السائل مساوياً لتركيز النقطة M فإنه تنفصل بلورات العنصر B بتركيز النقطة N ومحلول سائل بتركيز النقطة C حسب المعادلة:



يذكرنا هذا التفاعل بالتفاعل اليوتكتيكي ولكن الفارق بينهما أن التفاعل اليوتكتيكي يؤدي إلى تحول الطور السائل إلى طورين صلبين، بينما التفاعل المونوتكتيكي يؤدي إلى تحول الطور السائل إلى طور سائل وتبلور أحد العناصر. تتكون الخليطة تحت الخط CMN من طورين أحدهما بلورات

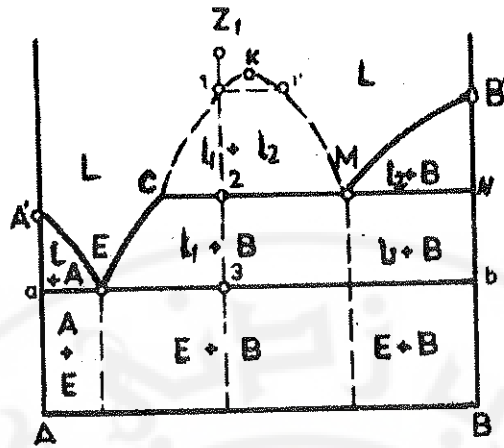
العنصر B والأخر طور سائل يتغير تركيزه بانخفاض درجات الحرارة حسب المنحني CE . لندرس على سبيل المثال مراحل تبريد العينة  $Z_1$  حيث نجد أنه تحت النقطة 1 يبدأ سائل بالانفصال ويتغير تركيب كل سائل حسب المنحني IC والمنحني 1'M . يبدأ التفاعل المونوتكتيكي عند درجة حرارة النقطة 2 . وبعد انتهاء التفاعل وباستمرارية التبريد تتابع بلورات العنصر B بالانفصال ويتغير تركيز السائل حسب المنحني CE حتى النقطة 3 حيث يحدث التفاعل اليونكتيكي وتكون البنية النهائية من بلورات العنصر B واليونكتيك  $E = (A + B)$  .

هناك حالة أخرى لمخططات التوازن للعناصر القابلة للذوبان مع بعضها بشكل محدود كما هو موضح في الشكل 3-26 الذي يدعى بالتوازن السنيتيكتيك Syntetick ويمكن شرحه بالمعادلة التالية:



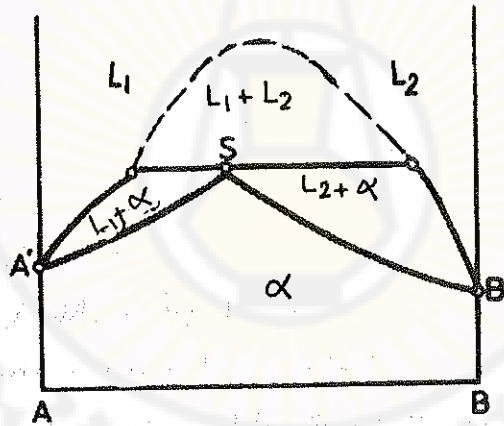
ب- العنصران B و A غير قابلين للذوبان ببعضهما على الإطلاق سواء في الحالة السائلة أو في الحالة الصلبة.

نجد هذه الحالة مثلاً عند Fe - Pb حيث لو حاولنا مزج خليطة من هذين المعدنين عند أية درجة حرارة فإن الرصاص ينفصل عن الحديد. تتكون البنية تحت درجة حرارة انصهار الحديد (  $1528^\circ C$  ) من بلورات الحديد ومن الرصاص المنصهر، وتحت درجة حرارة انصهار الرصاص (  $327^\circ C$  ) تتكون البنية من بلورات الحديد وبلورات الرصاص المنفصلة عن بعضها البعض، ويحدث هذا أيضاً عند الخلائط: Ag-Fe , Ag-V . ويبين الشكل 3-27 هذا النوع من مخططات التوازن.



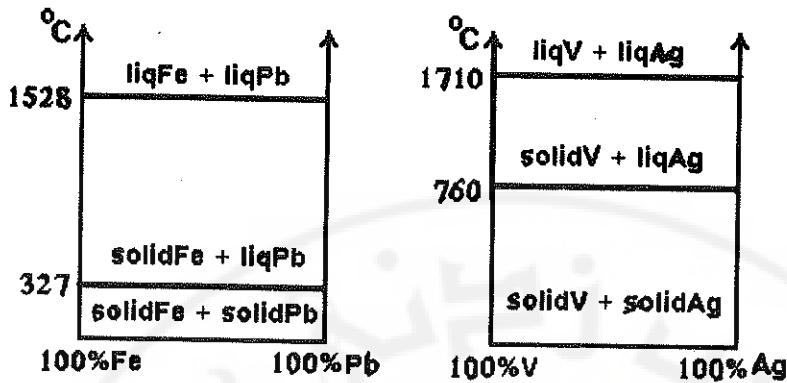
الشكل 25-3

مخطط توازن عنصران  $A$ ,  $B$  قابلان للذوبان مع بعضهما بشكل محدود في الحالة السائلة



الشكل 26-3

حالة أخرى لمخططات التوازن للعناصر القابلة للذوبان مع بعضها بشكل محدود في الحالة السائلة



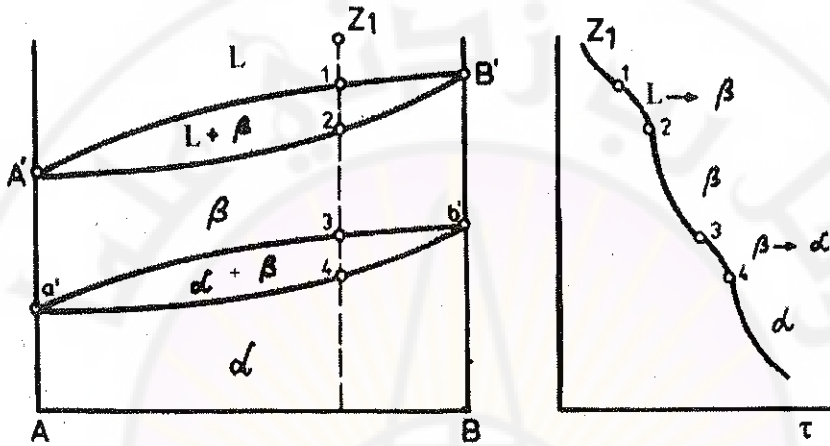
الشكل 27-3

مخطط التوازن لعنصران غير قابلين للذوبان ببعضهما على الإطلاق سواء في الحالة السائلة أو في الحالة الصلبة

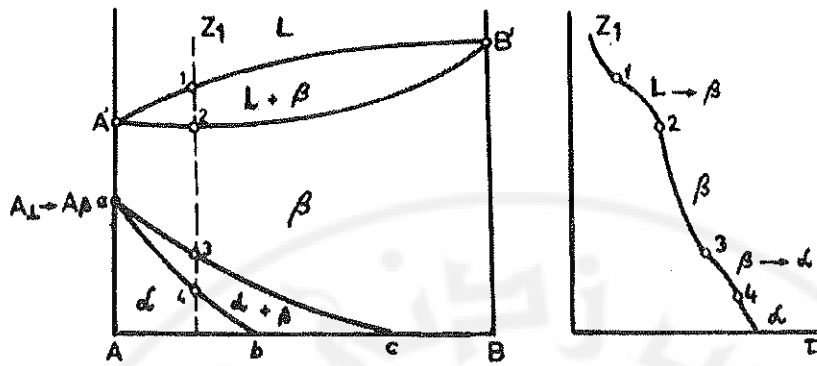
### 3 - 8 مخططات التوازن للخلائط التي تحدث فيها تغيرات التروبية:

يمكن لكثير من العناصر المعدنية أن تحدث فيها تغيرات وهي في الحالة الصلبة فتنتقل من طور إلى آخر ويحدث تبدل في بنيتها الداخلية وفي هيكلها الشبكية عند درجات حرارة ثابتة تدعى هذه التغيرات بالتغيرات الالتروبية. ولذلك نجد أن مخططات التوازن التي درسناها آنفاً تتبدل أيضاً وتصبح أكثر تعقيداً، ويتعلق تبدل شكل مخطط التوازن بالتأثير المتبادل بين عنصري الخليطة. لذلك من الأفضل أن نعطي بعض الأمثلة على مجموعة من هذه المخططات.

إذا كان المعدنان قابلاً للذوبان بشكل مطلق في الحالة السائلة والحالة الصلبة في هذه الحالة نجد أن هناك عدة احتمالات لأشكال المخططات وتتعلق بنوع العناصر التي تشكل المحلول الصلب.



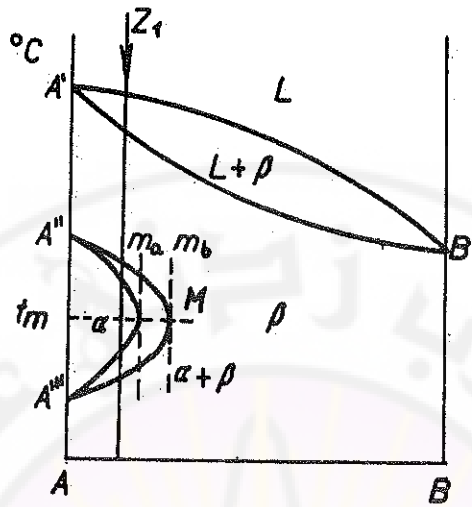
الشكل 3-28: المعدنان قابلاً للذوبان مع بعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة وفي الحالة الصلبة ويحدث تحول التروبي لكلا العنصرين حيث أنه لا يوجد بين العنصرين أي طور وسيط. يمثل الخط  $A'1B'$  خط بداية التبلور والخط  $A'2B'$  خط نهاية التبلور. كما يمثل الخط  $a3b$  خط بداية التحول الانتروبي والخط  $a4b$  خط نهاية التحول. ويحدث التحول الانتروبي هنا ضمن مجال حراري.



الشكل 3-29 : المعدنان قابلان للذوبان مع بعضهما بشكل مطلق

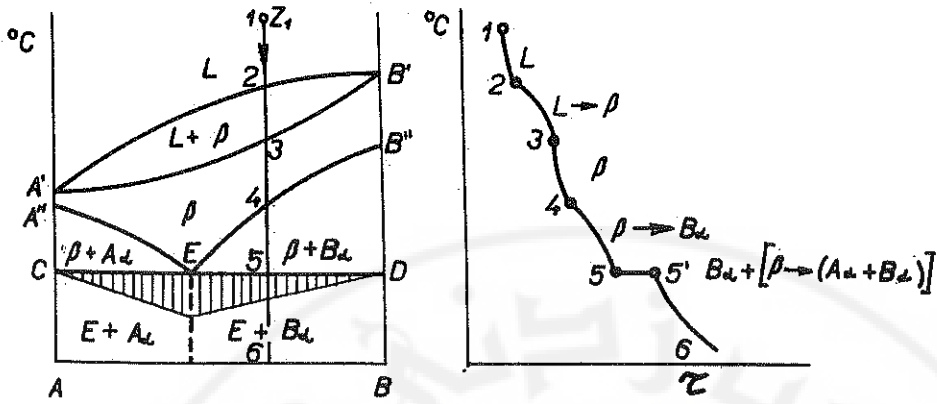
في الحالة السائلة وفي الحالة الصلبة ويحدث تحول التروبي للعنصر A فقط. تصبح قابلية الذوبان بانخفاض درجات الحرارة محدودة، ونلاحظ أنه ضمن المجال المحدد بالخطين ac و ab يتواجد الطوران  $\alpha$  و  $\beta$  حيث أن الطور  $\alpha$  عبارة عن المحلول الصلب للعنصر B في  $A_\alpha$ . يتواجد تحت الخط ab فقط المحلول الصلب  $\alpha$ .



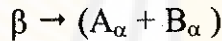


الشكل 30-3 : حالة مشابهة للحالة السابقة ولكن بفارق أن المحلول

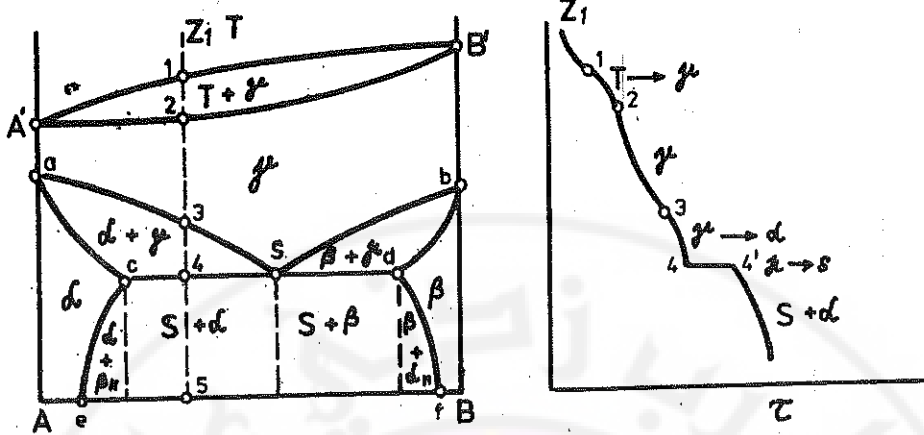
الصلب  $\alpha$  يمكن أن يتواجد ضمن مجال حراري معين  $t_m$  وبانخفاض درجات الحرارة يبدأ مجال  $\alpha$  بالتضيق حتى النقطة  $A'''$  حيث يتم إغلاق هذا المجال. تدعى النقطة  $M$  بنقطة التحول العكسي ( تحول الطور  $\alpha$  إلى الطور  $\beta$  ).



الشكل 3-31 : المعدنان قابلان للذوبان بشكل مطلق في الحالة السائلة ويكون في الحالة الصلبة مطلقاً فقط عند درجات حرارة مرتفعة وكلا العنصرين يتحول التروبياً، وعندما تنخفض درجات الحرارة يصبح العنصران غير قابلين للذوبان. يحدث عند درجة حرارة الخط CED تبدل المحلول الصلب  $\beta$  إلى الطور  $A_\alpha$  و  $A_\beta$  حسب المعادلة:



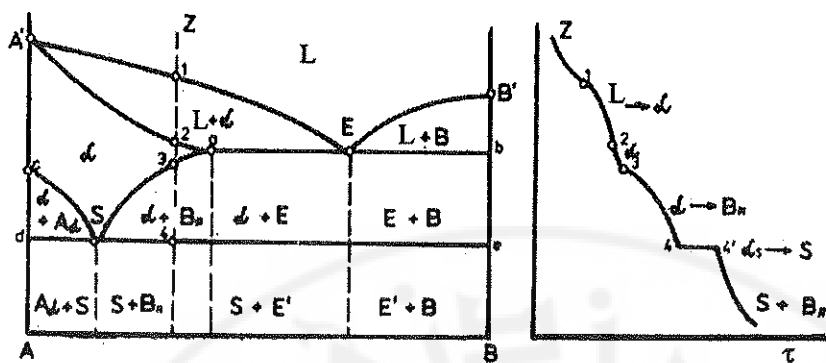
ويكون هذا التحول مشابهاً للتحول اليوتكتيكي من الطور السائل ولكن بما أن التحول هنا من الطور الصلب لذلك يدعى بالتحول اليوتكتويدي ودرجة الحرارة التي يحدث عندها هذا التحول تدعى بدرجة حرارة التحول اليوتكتويدي.



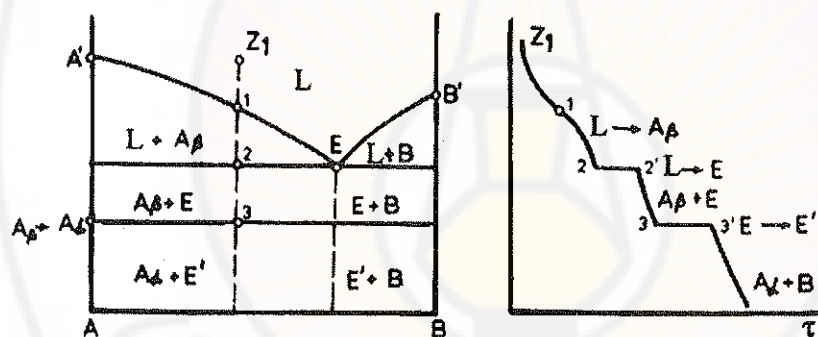
الشكل 32-3 : المعدنان يذوبان مع بعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة وفي الحالة الصلبة ويشكل المحلول الصلب  $\gamma$  ويحدث لكلا العنصرين تحولات التروبية ويكون في درجات الحرارة المنخفضة النوبان محدود. يبدأ بانخفاض درجات الحرارة على الخط  $as$  تحول الطور  $\gamma$  إلى الطور  $\alpha$ . وعلى الخط  $bs$  يبدأ تحول  $\gamma$  إلى  $\beta$  ويتشكل اليونكتويد تحت الخط  $csd$  حسب المعادلة:

$$\gamma_s \rightarrow (\alpha_c + \beta_d)$$

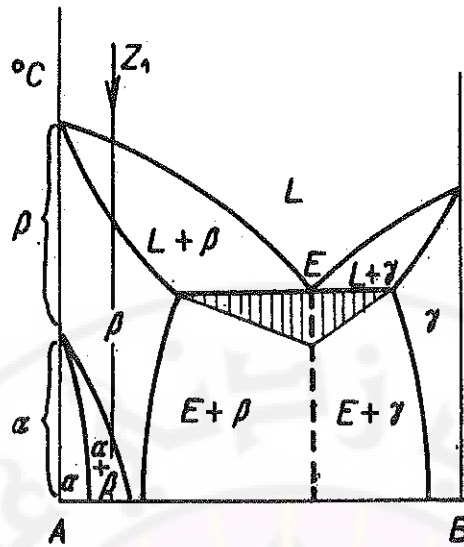
تدعى بنية الشبكة الواقعة على يسار النقطة  $s$  هيبيونكتويد ( ما قبل اليونكتويد ) والواقعة على يمين النقطة  $s$  تدعى هيبيونكتويد ( ما بعد اليونكتويد ).



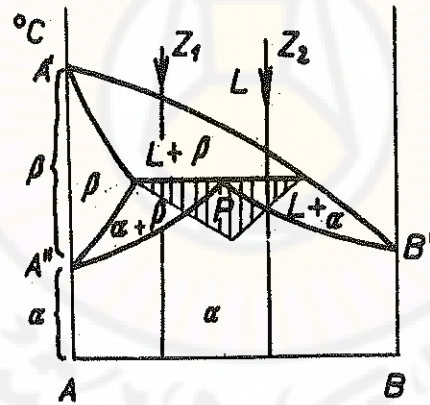
الشكل 3-33 : المعدنان قابلان للذوبان مع بعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة ويتغير في الحالة الصلبة المعدن A الترويباً. يتشكل المحلول الصلب  $\alpha$  وهو عبارة عن محلول بلورات B في A . يحتوي المخطط نقطة اليوتكتيك E وكذلك نقطة اليوتكتويد S .



الشكل 3-34 : مخطط توازن لمعدنان غير قابلين للذوبان مع بعضهما في الحالة الصلبة والعنصر A يتغير الترويباً عند درجة حرارة ثابتة.



الشكل 3-35 : المعدنان قابلان للذوبان مع بعضهما بشكل محدود في الحالة الصلبة ويتبدل المعدن A التروبياً ويشكل محلولاً صلباً، أي أنه قادر على إذابة كمية محدودة من العنصر B . ويذيب العنصر B كمية محدودة من العنصر A ويشكل المحلول الصلب γ



الشكل 3-36 : المعدنان قابلان للذوبان مع بعضهما بشكل محدود في الحالة الصلبة ودرجة حرارة انصهارهما متباعدة ( مخطط التحول البريتكتيكي ) والمعدن A يتغير التروبياً.



## الفصل الرابع

### فحص بنية المادة

- 1-4 الفحص الماكروسكوبي (العينى) للمادة
- 2-4 الفحص المجهرى ( الميكروسكوبى ) للمادة
- 3-4 الفحص بالمجهر الإلكتروني
- 4-4 تحليل البنية باستخدام الأشعة السينية
- 4 - 5 الطرق الفيزيائية لدراسة المادة





## فحص بنية المادة

### Inspection Of Structure Of Materials

يتم فحص المادة في المراحل المختلفة من الإنتاج والتصنيع، وفي مراحل التشكيل والتشغيل وفي فترات الصيانة. ويهدف الفحص في أي مرحلة من تلك المراحل إلى التأكد من سلامة المادة وخلوها من العيوب ومطابقتها للمواصفات، والتعرف عليها وعلى تركيبها وما قد يكون فيها من العيوب. وقد وجد أن العيوب يمكن أن تكون في المادة أو تتولد فيها أثناء التصنيع أو أثناء الاستخدام والاستعمال.

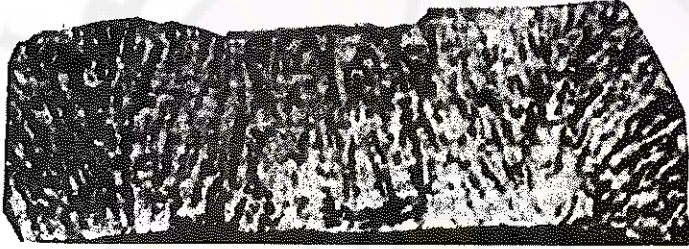
ولإجراء اختبار المادة سواء قبل حدوث الانهيار أو بعده، لابد من تحضير عينات منها. وتنقسم اختبارات الفحص إلى نوعين رئيسيين: اختبارات متلفة حيث يحتاج الاختبار في هذه الحالة إلى قطع أجزاء من المادة لإجراء الفحص عليها، واختبارات غير متلفة، حيث يتم فحص أجزاء المادة بدون حاجة إلى قطع عينات منها، أو إجراء تعديلات أو تغييرات في أبعادها أو خواصها. يتم تحليل البنية باستخدام ما يلي: المجهر الضوئي والمجهر الإلكتروني والأشعة السينية، إضافة إلى طرق الاختبارات غير المتلفة التي سنتناولها في الفصل القادم.

#### 4-1 الفحص الماكروسكوبي (العينى) للمادة:

تتيح طرق الفحص الماكروسكوبي تحديد الشكل العام للبنية البلورية للمعادن والسبائك في الأحجام الكبيرة ويمكن دراسة حجم البلورات الكبيرة وشكلها وأسلوب توزيعها، وكذلك التعرف على أسباب انهيار المادة. ولا يتطلب الفحص الماكروسكوبي أجهزة دقيقة ويمكن دراسة البنية بالوسائل التالية:

## 1. دراسة المكسر:

يعتبر فحص المكسر أبسط الطرق لإظهار البناء البلوري للمادة. وتتسم الأجسام البلورية على خلاف الأجسام غير المتبلورة ( مثل الزجاج والبوليميرات وغيرها ) بمكسر حبيبي ( بلوري ) ( الشكل 1-4 ). ويمكن من فحص المكسر الحكم على حجم الحبيبات وعلى خصائص عمليات الصهر والصب ( درجة حرارة الصب، سرعة انتظام تبريد السبائك ) مما يسمح بتقدير بعض خواص المعدن. وغالباً ما يدل المكسر الغليظ الحبيبات على انخفاض الخواص الميكانيكية للمشغولات بمقارنتها بالمشغولات الدقيقة الحبيبات.



الشكل 1-4

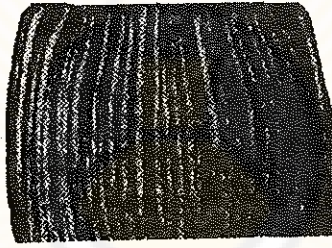
مكسر معدن الزنك

## 2. دراسة الشرائح الماكروسكوبية الخاصة:

تقطع في هذه الحالة من المشغولات الضخمة ( مثل الصبات والقوالب ) عينات يتم تجليخ سطحها ثم تسنفّر وتصلق وتعالج كيميائياً باستخدام محاليل خاصة لإظهار بنيتها. مثلاً تستخدم لإظهار بنية الفولاذ في حالة التحليل الماكروسكوبي محاليل مثل كبريتات الأمونيا  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  أو حمض كلور الماء  $\text{HCl}$  أو خليط من  $\text{HCl}$  و  $\text{HNO}_3$  و  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_3$  أو خليط من  $\text{CuCl}_2$  و  $\text{NH}_4\text{Cl}$ .

ينتج عن المعالجة الكيميائية للشريحة الماكروسكوبية تنميش انتقائي يظهر البنية الماكروسكوبية، ويوضح العيوب المسببة لعدم كون المشغولات مصمتة. ويمكن من خلال دراسة الشرائح الماكروسكوبية إظهار الملامح التالية:

- 1- شكل وتوزيع أوضاع الحبيبات في المعدن المصبوب.
- 2- الألياف ( المكونة من بلورات شديدة التشوه ) للمشغولات المشكلة بالطرق أو الكبس ( الشكل 2-4 ).
- 3- العيوب المؤدية إلى عدم كون المشغولات مصمتة ( الفجوة الأنبوبية والشقوق بين الحبيبات والمسامات الناتجة عن انكماش المعدن والفقاعات الغازية والشروخ ).
- 4- عدم التجانس الكيميائي الناتج عن عمليات التبلور أو عمليات المعالجة الحرارية.



الشكل 2-4

البنية الماكروسكوبية للفولاذ بعد الحدادة

مثال: لإظهار أماكن توزيع الكبريت في الفولاذ يلصق بالشريحة الماكروسكوبية لوح من ورق التصوير المصقول ( المحتوي على بروميد الفضة ) بعد غمسه في محلول حمض الكبريت بتركيز 5% . وبعد نزع لوح ورق التصوير

وتثبيته، يلاحظ على اللوح أماكن قاتمة هي أماكن تجمع الكبريت نتيجة لتكون كبريت الفضة ( حيث تتفاعل المركبات الكبريتية الموجودة على سطح الفولاذ مع حمض الكبريت حسب المعادلة:  $\text{FeS}(\text{MnS}) + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{H}_2\text{S} + \text{FeSO}_4(\text{MnSO}_4)$  ويتفاعل كبريت الهيدروجين الناتج مع بروميد الفضة المكون للطبقة الحساسة للوح حسب المعادلة:  $\text{H}_2\text{S} + 2\text{AgBr} = \text{Ag}_2\text{S} + 2\text{HBr}$  ). وإذا ما احتوى الفولاذ على قدر مرتفع نسبياً من الفسفور، فيمكن للفسفور أن يشترك في التفاعل مع بروميد الفضة مكوناً فوسفيد الفضة القاتم اللون.

#### 4-2 الفحص المجهرى ( الميكروسكوبى ) للمادة:

يتميز الفحص المجهرى عن الماكروسكوبى بتكبير مرتفع يتيح رؤية تفاصيل البنية المجهرية بوضوح وما تحتويه من شوائب وتصنيف هذه الشوائب وكذلك حجم وشكل الحبيبات وإمكانية قياس حجم هذه الحبيبات. كما نتمكن بالفحص المجهرى من معرفة الأطوار المختلفة التي تتكون منها البنية المعدنية والأحجام النسبية لهذه الأطوار بعضها بالنسبة للبعض بالإضافة إلى معرفة شكل الحبيبات لكل طور وتوزيعها خلال البنية الكلية. وتلقي هذه المعلومات الضوء على معظم الخواص الميكانيكية والفيزيائية لهذه البنية. ويتركز الفحص المجهرى على مساحة من المادة أصغر من نظيرتها أثناء الفحص الماكروسكوبى نظراً لاختلاف التكبير في الحالتين. ونستطيع بالفحص المجهرى أن نحصل على دراسة أدق لأسباب الكسور في الأجزاء المعدنية بعد دراسة عينات تحيط بمكان الكسر أو دراسة إخفاق المادة في مقاومة الظروف المعرضة لها.

إن طريقة تجهيز العينات المناسبة وتحضيرها لإجراء الفحص  
المجهري تمر بالخطوات التالية:

#### أ- اختيار العينة وقطعها:

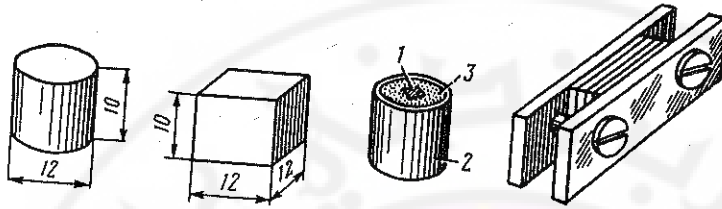
من الأهمية أن يكون اختيار العينة صحيحاً وممثلاً للمادة المراد فحصها  
نظراً لأن الاختيار الخاطئ للعينة يؤدي إلى نتائج خاطئة واستنتاجات غير  
صحيحة. ويجب عند اختيار العينة وقطعها مراعاة أن لا تغير عملية القطع  
والإعداد من طبيعة المادة أو تركيبها ( كاستخدام مواد التبريد للتغلب على  
المشكلات الناتجة عن ارتفاع درجات الحرارة أثناء قطع العينات، كما أنه في  
بعض الحالات يمكن أن ينتج عن عمليات القطع تشققات وتصدعات في المادة).  
تقطع عينات المواد غير مرتفعة القساوة على آلات قطع المعادن أو باستخدام  
المناشير الآلية أو اليدوية، أما عينات المواد القاسية فتقطع باستخدام قرص  
القطع الرقيق مع الانتباه إلى عدم السماح بارتفاع درجة حرارة العينة.

#### ب- تثبيت العينات:

تعتمد سرعة وسهولة إجراء عمليات جليخ وتلميع العينات إلى درجة  
كبيرة على حجمها. وتعتبر العينات المثالية هي العينات الاسطوانية ذات قطر  
10 - 12 ميليمتر وارتفاع ( 0.7 - 0.8 ) × القطر والعينات التي على شكل  
متوازي المستطيلات ذات الأبعاد 10×12×12 ميليمتر. أما العينات الصغيرة  
نسبياً ( أسلاك، صفائح، وغيرها ) أو سهلة الكسر فيصعب إحكام مسكها (   
تثبيتها ) لإجراء عمليات الجليخ والتلميع. توجد عدة طرق لتثبيت هذه العينات  
يمكن جمعها في نوعين أساسيين هما: طريقة المشبك وطريقة الحاضن.

تعتمد طريقة المشبك على أساس مسك العينات معاً في مشبك مصنع  
من مادة قريبة من المادة المراد فحصها، وعادة تصنع معظم المشابك من الفولاذ  
الطري أو سبائك الألمنيوم أو سبائك النحاس. ويمكن في بعض الأحيان استخدام

المطاط أو البلاستيك كمادة وسيطة بين العينة والمشبك. يوضح الشكل رقم 3-4 طريقة المشبك وهي طريقة سهلة.



الشكل 3-4

طريقة تثبيت العينات بالمشبك

تعتبر طريقة الحاضن أشهر الطرق المستخدمة في مسك العينات وتثبيتها وأكثرها استخداماً في الوقت الراهن. وتعتمد على التثبيت باستخدام البلاستيك بطريقتين هما: الطريقة الساخنة والطريقة الباردة.

1. التثبيت على الساخن: يتم تثبيت العينة في مسحوق باكليت باستخدام مكبس خاص يحتوي على مسخنات (الشكل 4-4-أ). تنظف العينة وتوضع في حجرة المكبس وتحاط بمسحوق التثبيت، ثم يتم رفع الضغط تدريجياً وبنفس الوقت ترفع درجة الحرارة تدريجياً إلى أن تصل إلى حوالي 100 - 150 درجة مئوية. ويحتفظ بالعينة تحت هذه الظروف لمدة عشر دقائق، ثم يتم إزالة الضغط وتترك العينة لتبرد (الشكل 4-4-ب، ث).

2. التثبيت على البارد: إذا كانت العينات كبيرة ولا يمكن إدخالها في حجرة المكبس أو هناك مخاوف من تأثير درجات الحرارة على التكوين

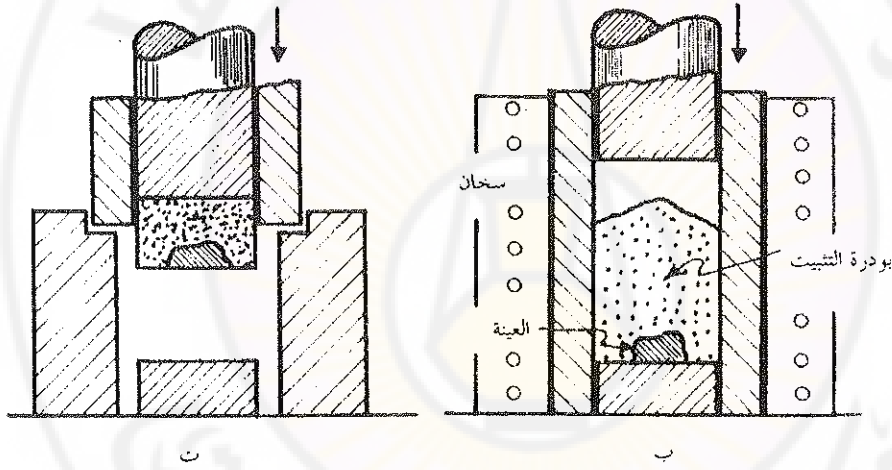
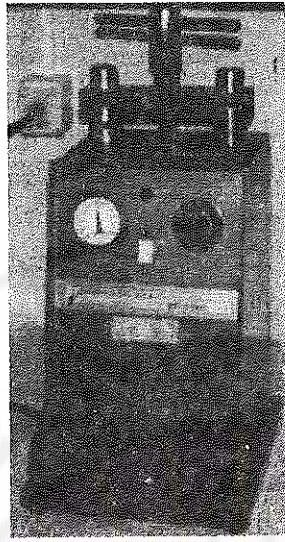
البلوري فعندئذ تثبت العينة على البارد. ويستخدم في هذه الحالة سائل من مادة بوليمرية أو مسحوق من إحدى المواد البلاستيكية والذي يتصلب عند خلطه بالمجمد المناسب ( مثل Epoxy resin ). ويوضح الشكل 4-5 طريقة التثبيت على البارد.

#### ت- تجليخ وتلميع العينات:

يمكن تقسيم هذه العملية لمرحلتين:

المرحلة الأولى: هي عملية التجليخ الدقيق، وتجرى باستخدام ورق تجليخ ( صنفرة ) مندرج النعومة ويبدأ بالأخشن ( 240 درجة نعومة ) وتندرج حتى 600 أو 1000 درجة نعومة. تنفذ هذه المرحلة بوضع ورق التجليخ على لوح زجاجي وتمسك العينة وتجلخ في اتجاه طولي عمودياً على اتجاه الخدوش الموجودة بالعينة أصلاً حتى تختفي هذه الخدوش وتظهر مكانها خدوش أدق في اتجاه التجليخ تحدثها ورقة الصنفرة. عندئذ ننتقل إلى الدرجة الأنعم ونجلخ في اتجاه عمودي على الاتجاه السابق حتى تتلاشى الخدوش المتكونة من العملية السابقة ونكرر هذا العمل حتى نصل إلى أنعم درجة مستخدمين ضغطاً أخف كلما انتقلت من درجة إلى الدرجة الأنعم. ويمكن الإسراع بعملية التجليخ بدون مخاطر ارتفاع درجات الحرارة الناتجة من التجليخ أو مخاطر تلوث سطح العينة بالمادة الفعالة في ورق التجليخ باستخدام ورق التجليخ المقاوم للماء ( كربيد



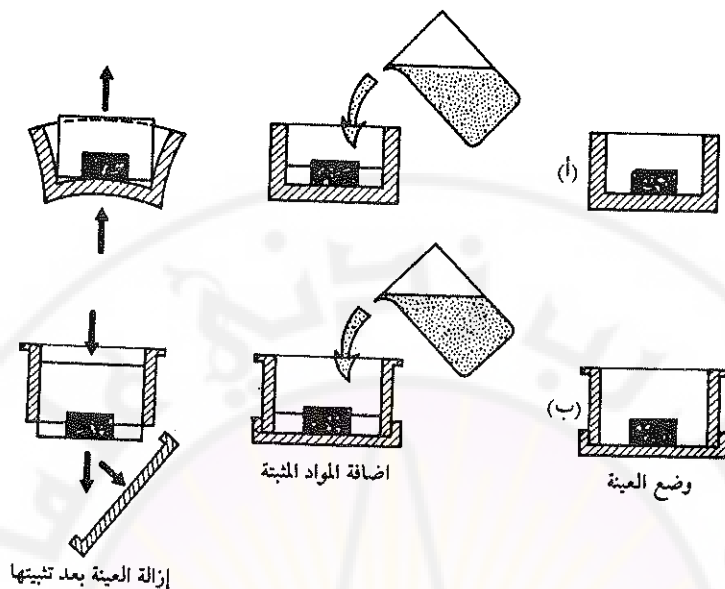


الشكل 4-4

تثبيت العينات على الساخن

أ- مكبس تثبيت العينات على الساخن، ب- العينة في حجرة الكبس، ج- الحصول على العينة بعد التثبيت





الشكل 4-5

تثبيت العينات على البارد

أ- باستخدام قالب قابل للثني

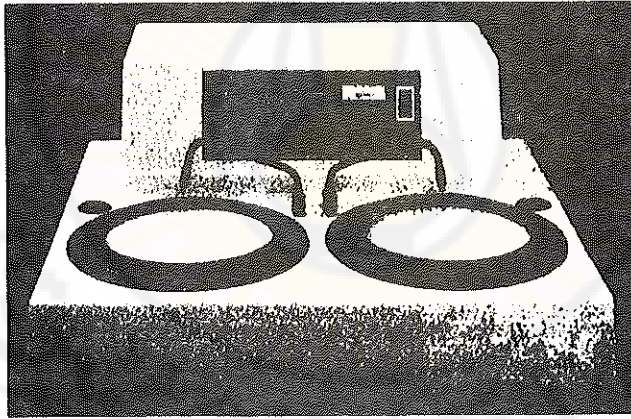
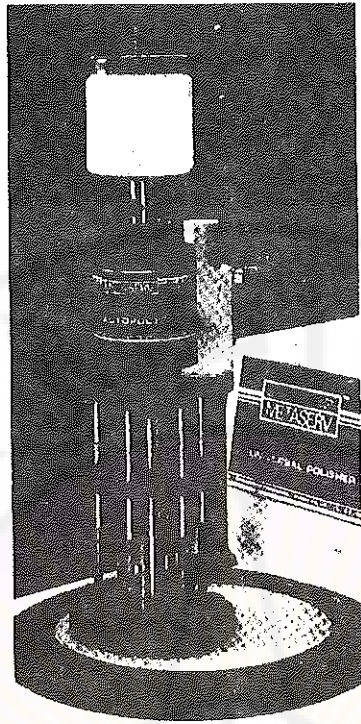
ب- باستخدام قالب من عدة قطع

السيكون ( مع استخدام الماء للغسيل المستمر والتبريد أثناء التجليخ بالنسبة للمعادن والسبائك اللدنة كالألمنيوم وسبائكه ويمكن استخدام البرافين كمخفف للاحتكاك.

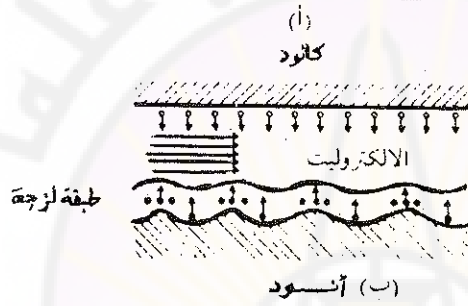
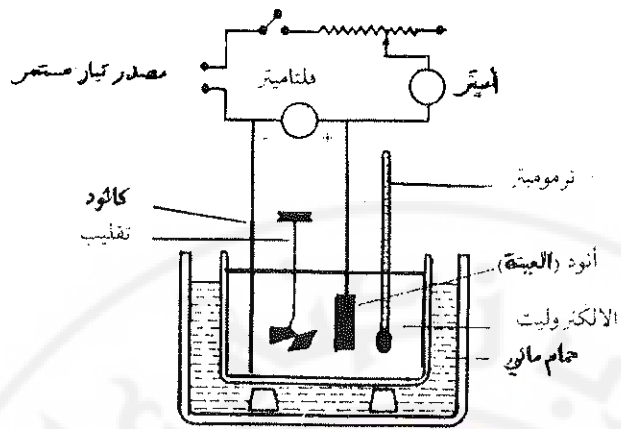
المرحلة الثانية: هي عملية الصقل، يتم التلميع بإزالة الخدوش الدقيقة جداً باستخدام مادة صلبة تقوم بعملية صقل السطح، بعد تكوين معلق منها مع الماء، على قماش شمواء أو جوخ مثبت على قرص يدور بسرعة عالية (الشكل 4-6).

ويستخدم أكسيد الألمنيوم ( الألومينا ) أو أكسيد الكروم الأخضر أو المغنيسيا ( أكسيد الماغنسيوم ). ويفضل استخدام عجينة مسحوق الماس خاصة مع الأجسام الصلبة عالية الصلادة، ويتواجد هذا المسحوق بدقة من 0.25 إلى 6 ميكرون. لا تظهر بعد الصقل مباشرة تفاصيل البنية المكونة بل يبدو السطح لامعاً كالمرآة.

**الصقل الإلكتروني:** يقوم الصقل الإلكتروني على استخدام محلول إلكتروليتي مناسب في دائرة كهربائية تستخدم التيار المستمر، وتستخدم هذه الطريقة أساساً للمعادن والسبائك الطرية وتمتاز بأنها تعطي سطحاً أملساً خالياً من التشوهات. كم أن هذه العملية تغني عن الإظهار ( التتميش ) حيث تظهر بعد الصقل الإلكتروني البنية الداخلية للمادة. ويوضح الجدول 4-1 التركيب الكيميائي للمحاليل الإلكترونية المستخدمة، كما يوضح الشكل 4-7 المبدأ العام لطريقة الصقل هذه.



الشكل 4-6  
قرص الصقل الدوار



الشكل 4-7  
الصفق الإلكتروليتي

الجدول رقم 4-1 تركيب المحاليل الإلكتروليتية المستخدمة في الصقل الإلكتروليتي

| المادة              | الإلكتروليت                                                 | المهبط                  | شدة الجهد (فولت ) | الزمن (ثانية) | درجة الحرارة C° |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------|---------------|-----------------|
| ألومنيوم            | 50 مل حمض كلور الماء<br>1000 مل حمض الخل الجليدي            | فولاذ<br>مقاوم<br>للصدأ | 55-50             | 25-10         | أقل من<br>35    |
| السبيكة<br>Al-Zn-Mg | 300-100 غرام حمض الكروميك<br>100 مل حمض أرثوفوسفوريك        | فولاذ<br>مقاوم<br>للصدأ | 12-3              | 10            | 90-50           |
| نحاس                | حمض أرثوفوسفوريك                                            | نحاس                    | 30                | 60            | 20              |
| سبائك<br>النحاس     | 700 مل حمض أرثوفوسفوريك<br>350 مل ماء                       | نحاس                    | 2-1.5             | -900<br>1800  | 20              |
| حديد                | 185 مل حمض بركلوريك<br>965 مل حمض الخل الامائي<br>50 مل ماء | فولاذ<br>مقاوم<br>للصدأ | 50-40             | -480<br>900   | أقل من<br>30    |
| رصاص                | 200 مل حمض بركلوريك<br>800 مل كحول إيثيلي                   | فولاذ<br>مقاوم<br>للصدأ | -70<br>100        | 30-10         | أقل من<br>30    |
| نيكل                | 390 مل حمض الكبريت<br>290 مل ماء                            | نيكل                    | 60                | -240<br>360   | أقل من<br>35    |
| قصدير               | حمض بركلوريك                                                | ألومنيوم                | 60-50             | 15-10         | 35 >            |

### ث-الإظهار ( التتميش ):

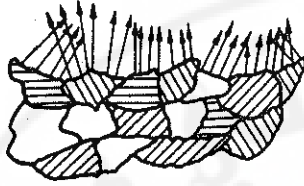
تتم عملية الإظهار بعد الانتهاء من عمليات الجلك والصقل، وتهدف إلى إظهار البنية المجهرية للمادة. ويعتمد الإظهار على عملية التآكل الانتقائي لسطح العينة عند تعرضها لمادة كيميائية أكلة. كما توجد بعض المواد التي يمكن التعرف على بنيتها المجهرية دون الحاجة إلى عملية الإظهار. كذلك لا تحتاج المواد التي تم صقلها بطريقة الصقل الإلكتروني إلى عملية الإظهار.

يبدو السطح المعدني بعد صقله مباشرة تحت المجهر مضيقاً كالمرآة بلا تفاصيل مرئية ويرجع ذلك إلى أن الأشعة الضوئية الساقطة عليه رأسياً تنعكس مارة بنفس مسارها إلى العين فيبدو السطح مضيقاً إضاءة متجانسة كما هو موضح في الشكل 4-8 . ولكن بمعالجة السطح بمحلول كيميائي مظهر يبدأ بمهاجمة حدود الحبيبات فتتميز عن البلورات باختلاف كمية الضوء المنعكس من كل منهما ثم يبدأ المحلول المظهر في مهاجمة الحبيبات فيتحوّل السطح المستوي لكل حبيبة إلى ما يشبه المدرجات الموازية لاتجاه المستويات البلورية في كل بلورة خضوعاً لمبدأ عدم تساوي الخواص الاتجاهية في البلورات وبالتالي فإن كمية الضوء المنعكسة من البلورات المختلفة تتباين باختلاف زوايا الانعكاس نتيجة اختلاف ميول أسطح الانعكاس في البلورات المختلفة ومن ثم فإنه يمكن مشاهدة تباين الحبيبات وحدودها وكذلك الأطوار المختلفة لتباين مقدار تفاعلها مع المحلول المخرش ( الشكل 4-8 ب ).

تتم عملية الإظهار بغمس العينة المصقولة في محلول الإظهار (المخرش ) أو بمسح سطحها بقطعة من القماش أو القطن مبللة بالمحلول، لزمن معين ثم تغسل العينة بالماء وتجفف في هواء ساخن. وبين الجدول 2-4 محاليل الإظهار المستخدمة لبعض المواد.

|       |      |      |
|-------|------|------|
| رمادي | أبيض | أسود |
|-------|------|------|

سطح مصقول  
أشعة الضوء الساقطة والمتنكسة



(ب) بعد التنش



(أ) قبل التنش

#### الشكل 4-8

انعكاس الضوء الساقط على سطح المادة

أ- قبل الإظهار

ب- بعد الإظهار

الجدول 2-4 محاليل الإظهار لبعض المواد

| المادة                               | تركيب محلول الإظهار                                                                | زمن الإظهار                   |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| رصاص                                 | 5% حمض الأزوت مع الماء                                                             | تغمس 5-15 ثانية               |
| ألومنيوم                             | 0.5% حمض الهيدروفلوريك مع الماء                                                    | يمسح السطح لمدة               |
|                                      | 1% هيدروكسيد الصوديوم مع الماء                                                     | 5-15 ثانية                    |
|                                      | 1% حمض الفلور + 1.5% حمض كلور الماء + 2.5% حمض الأزوت + 95% ماء                    | تغمس العينة لفترة 30-60 ثانية |
| نحاس                                 | 50% بروكسيد + 50% هيدروكسيد أمونيا                                                 | يمسح السطح لمدة               |
|                                      | 5 غرام كلوريد الحديد + 10 سم <sup>3</sup> حمض كلور الماء + 100 سم <sup>3</sup> ماء | 5-15 ثانية                    |
| نيكل وكوبالت                         | 50% حمض الأزوت المركز + 50% حمض الخل الجليدي                                       | يمسح السطح لمدة 10-15 ثانية   |
| فولاذ منخفض الكربون، لحام، مارتنيسيت | 2% حمض الأزوت في كحول إيثيلي                                                       | تغمس العينة لفترة 10-30 ثانية |
| برليت، حديد صب، فولاذ                | 5% حمض البيكريك في كحول إيثيلي                                                     | تغمس العينة لفترة 15-30 ثانية |



| المادة               | تركيب محلول الإظهار                                                                | زمن الإظهار                  |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| متوسط وعالي الكربون  |                                                                                    |                              |
| فولاذ مقاوم للصدأ    | 75% حمض كلور الماء + 25% حمض الآزوت                                                | يمسح السطح لمدة 10-30 ثانية  |
| فولاذ أوستينيتي      | 5 غرام كلوريد الحديد + 25 سم <sup>3</sup> حمض كلور الماء + 100 سم <sup>3</sup> ماء | يمسح السطح لمدة 10-30 ثانية  |
| سمنتيت               | 2 غرام حمض البيكريك + 24 غرام صودا كاوية + 75 سم <sup>3</sup> ماء                  | تغمس العينة لفترة 10 دقائق   |
| الكربيدات في الفولاذ | 10 غرام بوتاسيوم فري سيانيد + 10 غرام هيدروكسيد بوتاسيوم + 100 سم <sup>3</sup> ماء | تغمس العينة لفترة 5-10 دقائق |

تستخدم في بعض الأحيان للإظهار محاليل تكون على سطح العينة رواسباً ناتجة عن التفاعل بين مركبات المحلول. ويختلف سمك هذه الرواسب على الأطوار المختلفة مما يتيح، نتيجة لتداخل الضوء، الحصول على ألوان مختلفة. كما ويمكن إظهار البنية بطريقة الإظهار الحراري حيث تسخن العينة حتى درجة حرارة تتراوح بين 200-600 درجة مئوية في جو مؤكسد. وتختلف نتيجة لهذا التسخين سمك طبقة الأكاسيد المتكونة على الأطوار المختلفة المكونة للبنية، مما يؤدي إلى ظهورها بألوان مختلفة عند دراستها مجهرياً.

### ج- المجهر الضوئي ( الميكروسكوب ):

تدرس بنية المادة بواسطة المجهر الميتالوغرافي الضوئي وذلك بدراسة انعكاس الضوء عن سطح العينة. ويبين الشكل 4-9 المجموعة البصرية والشكل العام للمجهر الميتالوغرافي الرأسي الواسع الانتشار في الأبحاث. ويتيح هذا المجهر دراسة العينات سواء في المجال الساطع أو المجال المظلم، وتحت الإضاءة الرأسية أو باستخدام الضوء المستقطب. ويتراوح معامل التكبير بين 60 و 1440 مرة. ويستخدم لأهداف البحث العلمي نوع آخر هو المجهر الميتالوغرافي الأفقي الذي يبلغ معامل تكبيره حتى 1300 مرة في حالة الرؤية العينية، ويتعدى ذلك إلى حوالي 2000 مرة في حال التسجيل الفوتوغرافي للبنية مع ضمان درجة عالية من حدة ووضوح الصور.

لا تتعدى قدرة التحليل للمجهر الضوئي ( وهي عبارة عن أقل بعد لتفاصيل البنية يمكن تمييزه باستخدام هذا المجهر ) 0.2 ميكرون أي 2000 أنغستروم، حيث لا يمكن استخدام هذا المجهر لتمييز تفاصيل دقائق البنية التي يقل بعدها عن 0.2 ميكرون. ويعني هذا أن أقصى تكبير يمكن الاستفادة منه في المجهر الضوئي هو 2000 مرة. ولا تؤدي زيادة التكبير عن ذلك إلى الكشف عن أية تفاصيل جديدة أصغر في البنية، بل تؤدي فقط إلى زيادة مقياس رسم الصورة.

### د- قياس حجم الحبيبات:

يؤثر حجم الحبيبات في جميع أنواع المواد وخاصة المعادن وسبائكها تأثيراً مباشراً على الخواص الميكانيكية، لهذا يجب تحديد أحجام الحبيبات للتمكن من استنتاج أو توقع الخواص المطلوبة. ويصعب في الحقيقة تحديد أحجام الحبيبات لأنها تمثل كتلاً متباينة في أشكالها وأحجامها في الأبعاد الثلاثة الرئيسية، إلا أنه يمكن الاقتراب من الحقيقة. لذلك نقوم بعمل مقاطع في العينات

وإظهار حدود الحبيبات بطرق التتميش وافترض أن المساحات التي سنشاهدها على السطح ( في البعدين ) تتناسب مع الأحجام الحقيقية ويمكن تكرار هذه المقاطع في الأبعاد الثلاثة للاقتراب من قياس الأحجام.

يوجد ثلاثة طرق رئيسية لتقدير حجم الحبيبات من مراقبة سطح العينة المطلوبة تحت المجهر أو من الصورة المطبوعة من المجهر.

#### 1. طريقة المساحة الحرة:

تختار مساحة مناسبة تحتوي عدداً كبيراً من الحبيبات وتحاط بخط يحتملها ويمر بحدود حبيباتها الخارجية كما في الشكل 4-10-أ وتقاس هذه المساحة بواسطة البلاينيتر ثم يجري حصر عدد الحبيبات داخل هذه المساحة وتقسم المساحة المقاسة بالبلاينيتر على عدد الحبيبات ومربع معامل التكبير المجهرى وتكبير الصورة كما يلي:

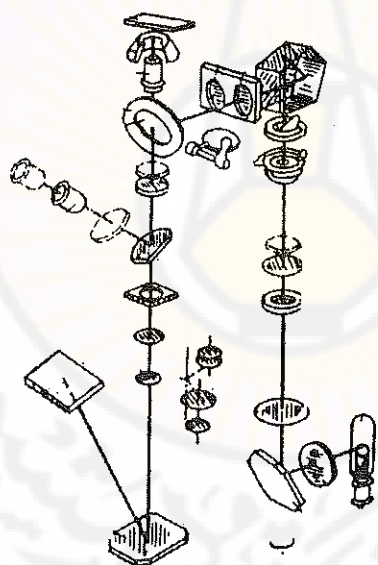
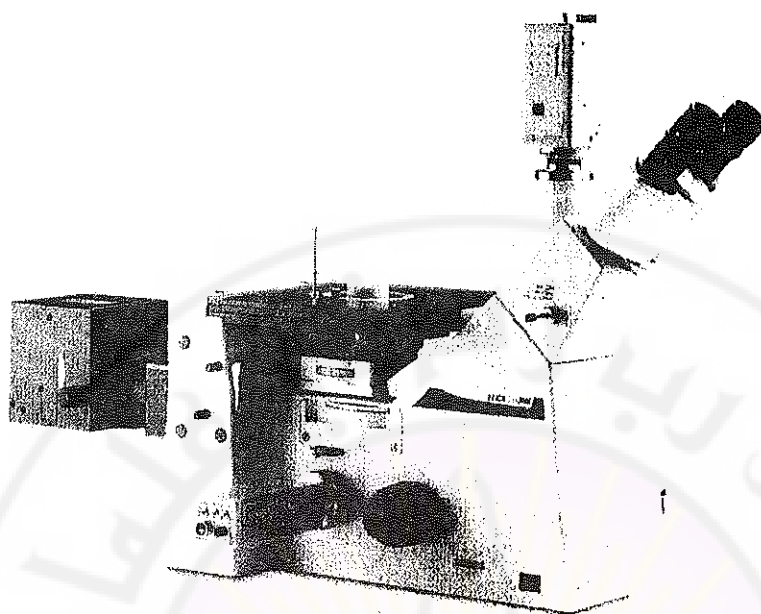
$$A_m = \frac{a * 10^6}{N * M^2}$$

حيث:  $A_m$  - حجم الحبيبات المتوسط (  $\mu m^2$  )

a - المساحة المقاسة بالبلاينيتر (  $mm^2$  )

N - عدد الحبيبات المحصاة داخل المساحة المنظورة

M - نسبة التكبير في المجهر × نسبة التكبير في ورق التصوير



الشكل 4-9

الشكل العام ( أ ) والمجموعة البصرية ( ب ) للمجهر الضوئي

مثال:

إذا كانت نسبة التكبير للمجهر  $100\times$  ونسبة تكبير الصورة  $1\times$  وقيست المساحة المختارة على العينة بواسطة البلانيومتر وقدرها  $1850\text{mm}^2$  وأحصى عدد الحبيبات داخل هذه المساحة فكانت 176 حبيبة فإن الحجم المتوسط للحبيبات هو:

$$A_m = \frac{10^6 * 1850}{100^2 * 176} = 1051 \mu\text{m}^2$$

2. طريقة الدائرة:

تعتبر هذه الطريقة أسهل من الأولى حيث يمكن الاستغناء عن تقدير المساحة بجهاز البلانيومتر، إذ ترسم دائرة اختيارية بقطر مناسب على ورق التصوير ( الشكل 4-10 ب ) وتحسب مساحة هذه الدائرة (  $a, \text{mm}^2$  ) ثم يحصى عدد الحبيبات الواقعة داخل الدائرة بشكل كامل وكذلك عدد الحبيبات التي قطعها محيط الدائرة ويحسب حجم الحبيبات المتوسط من المعادلة:

$$A_m = \frac{a * 10^6}{M^2 (N + 0.67n)}$$

حيث:  $A_m$  - حجم الحبيبات المتوسط (  $\mu\text{m}^2$  )

$a$  - مساحة الدائرة (  $\text{mm}^2$  )

$N$  - عدد الحبيبات المحصورة داخل الدائرة

$n$  - عدد الحبيبات التي يقطعها محيط الدائرة

$M$  - نسبة التكبير في المجهر  $\times$  نسبة التكبير في ورق التصوير

مثال:

عند فحص عينة تحت المجهر بتكبير  $75\times$  أمكن رسم دائرة قطرها  $38\text{mm}$  ووجد أن عدد الحبيبات الكاملة داخل الدائرة هو 126 حبيبة، وعدد الحبيبات التي يقطعها محيط الدائرة هو 45 حبيبة، أحسب حجم الحبيبات المتوسط.

مساحة الدائرة المرسومة  $a = 1135 \text{ mm}^2$

$$A_m = \frac{a * 10^6}{M^2 * (N + 0.67 * n)} = \frac{1135 * 10^6}{75^2 * (126 + 0.67 * 45)} = 1293 \mu\text{m}^2$$

### 3. الطريقة القطرية:

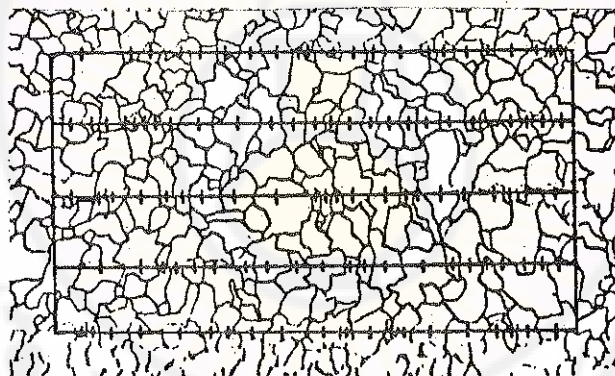
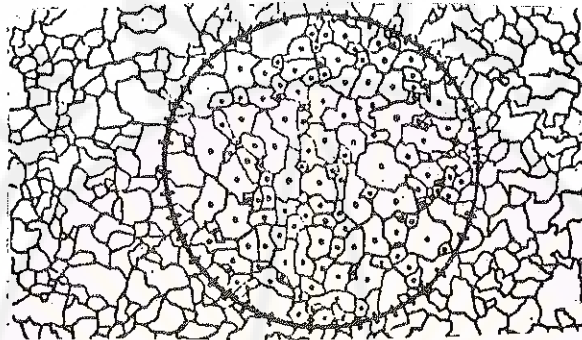
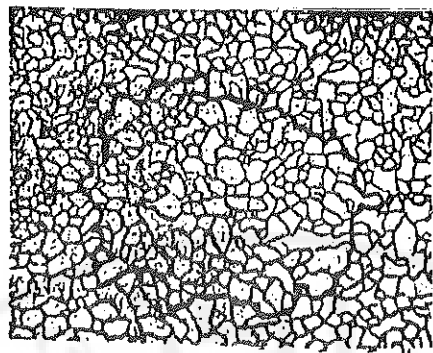
لا يقاس في هذه الطريقة مساحة الحبيبات كدليل على حجمها إنما يقاس القطر المتوسط للحبيبات مرة في الاتجاه الطولي ( استطالة الحبيبات ) ومرة في الاتجاه العرضي المتعامد عليه إذا كانت العينة قد تعرضت لتشكيل على البارد. وتحدد النسبة بين قطر الحبيبات المتوسط في الاتجاه الطولي والقطر المتوسط في الاتجاه العرضي مقدار التشكيل على البارد الحادث للعينة. ويتم الحساب ( الشكل 4-10 ت ) برسم على الصورة عدد من الخطوط المتوازية بين 5 - 10 خطوط بطول محدد مقداره  $L$  بالمليمتر ويحصى عدد الحبيبات التي يقطعها كل خط على حدة (  $N$  ) مع الأخذ في الاعتبار أنه إذا أحصى جزء الحبيبة الأولى لا يحصى جزء الحبيبة الأخيرة إذا تصادف ولم تكتمل الحبيبة في أول الخط وأخيره، وباعتبار عدد الخطوط المرسومة  $p$  ونسبة التكبير  $M$  فإنه يمكن حساب القطر المتوسط للحبيبات  $D_m$  في هذا الاتجاه بالمعادلة:

$$D_m = \frac{10^3 * p * L}{N * M} \mu\text{m}$$

مثال:

إذا أحصى عدد الحبيبات في الخطوط الخمسة المرسومة وكانت على النحو التالي  $N = 22 + 22 + 23 + 25 + 24 = 116$  وكان طول كل خط  $L = 59.7 \text{ mm}$  ونسبة التكبير  $M = 75$  فإن القطر المتوسط للحبيبات سيكون

$$D_m = \frac{10^3 * p * L}{N * M} = \frac{10^3 * 5 * 59.7}{75 * 116} = 34 \mu\text{m}$$



الشكل 4-10

قياس حجم الحبيبات

أ- طريقة المساحة الحرة، ب- طريقة الدائرة، ت- الطريقة القطرية

#### 3-4 الفحص بالمجهر الإلكتروني:

تتميز المجاهر الإلكترونية بقدرة تحليل تزيد كثيراً عن مثيلاتها في المجاهر الضوئية مما يمكن من دراسة تفاصيل أدق في بنية المادة. وإن استخدام الأشعة الإلكترونية التي تتسم بموجات قصيرة للغاية وطولها  $(0.04 - 0.12 \times 10^{-8} \text{ cm})$  يتيح إمكانية تمييز تفاصيل عناصر البنية التي يتراوح بعدها بين  $5 \text{ \AA} - 2$  ، أي تقترب في أبعادها من البعد بين الذرات في البلورة.

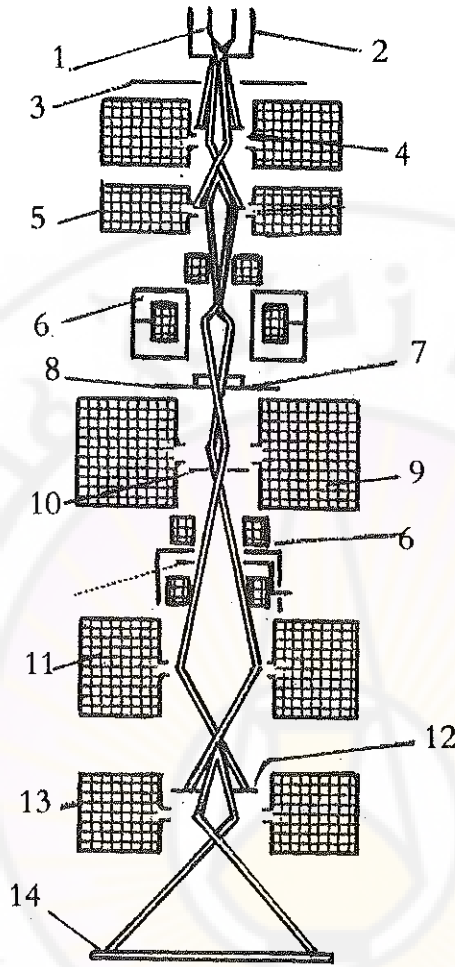
يعتمد مبدأ الفحص باستخدام الأشعة الإلكترونية على نفاذ حزمة الإلكترونات خلال العينة المدروسة. ونظراً لتباين القدرة على تشتيت الإلكترونات لدى عناصر البنية المختلفة في العينة الرقيقة، فإننا نحصل على صورة لهذه البنية. ويتكون المجهر الإلكتروني من مصدر للإلكترونات يعرف باسم مدفع الإلكترونات، وعدد من العدسات الكهرومغناطيسية ( الشكل 4-11). تنبعث الإلكترونات من المهبط ( لولب من التنغستن ) عند تسخينه. ويؤثر بين المهبط والمصعد مجال كهربائي هائل، يؤدي إلى تحرك الإلكترونات في اتجاه المصعد بسرعة هائلة. تعبر الإلكترونات خلال ثقب في المصعد ثم خلال العدسات المكثفة الموجودة أسفله. وتقوم هذه العدسات نفس عمل العدسات الجسمية ( الشينية ) والعينية في الجهر الضوئي. تركز العدسات المكثفة الإلكترونات عن طريق تفاعل الإلكترونات مع المجال المغناطيسي القوي الذي تصنعه العدسات. وتسقط حزمة الإلكترونات المركزة على العينة الرقيقة الجارية دراستها. تتراوح قدرة التحليل لهذه المجاهر  $120 \text{ \AA} - 5$  كما تتراوح نسبة التكبير بين  $100000 - 500000$  مرة.

عند دراسة المعادن فإن الشرائح المعدنية غير منفذة للإلكترونات لذلك يستعاض عن دراسة سطح المعدن بدراسة طبعة لذلك السطح ( بعد تنميته ) تمثل بدقة كل تفاصيل هذا السطح، وبالتالي دقائق بنية سطح المعدن. وتجهز



هذه الطبعة بترسيب دهان راتنجي أو مسحوق كوارتزي أو كربوني على سطح العينة، ثم تدرس هذه الطبعة المنفذة للإلكترونات باستخدام المجهر الإلكتروني. يمكن أن تتم دراسة العينات المعدنية مباشرة بجعل العينات منفذة للإلكترونات وذلك بتحويلها إلى سمك  $100-2000 \text{ \AA}$  ثم تدرس هذه الطبقات الرقيقة بالإلكترونات النافذة.

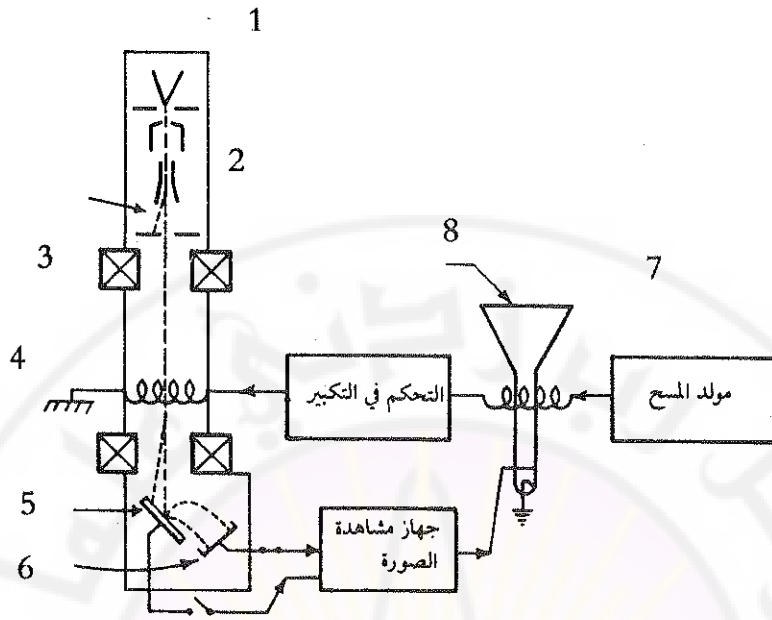
اتسع في السنوات الأخيرة استخدام المجاهر الإلكترونية الماسحة، التي تتكون فيها الصورة بواسطة الإلكترونات الثانوية المنبعثة من السطح المدروس والساطعة على الشاشة الفلورية ( الشكل 4-12). ويستخدم هذا النوع من المجاهر لدراسة تفاصيل السطح الخارجي للمادة.



الشكل 4-11

### رسم تخطيطي للمجهر الإلكتروني

- 1- المهبط، 2- قطب مكثف، 3- المصعد، 4- ثقب المكثفات، 5- المكثفات،
- 6- المصححات، 7- الشريحة الجارية دراستها، 8- حامل الشريحة، 9- العدسة
- الجسمية، 10- ثقب العدسة، 11- العدسة الوسطية، 12- فتحة تحديد مجال البصر،
- 13- غدة الإسقاط، 14- شاشة المجهر.



الشكل 4-12

رسم تخطيطي للمجهر الإلكتروني الماسح

1-المهبط، 2- ألواح التحويل، 3- عدسات إلكترونية، 4- ربط الحيو، 5- العينة، 6- المجمع، 7- الشاشة، 8- الصورة.

#### 4-4 تحليل البنية باستخدام الأشعة السينية:

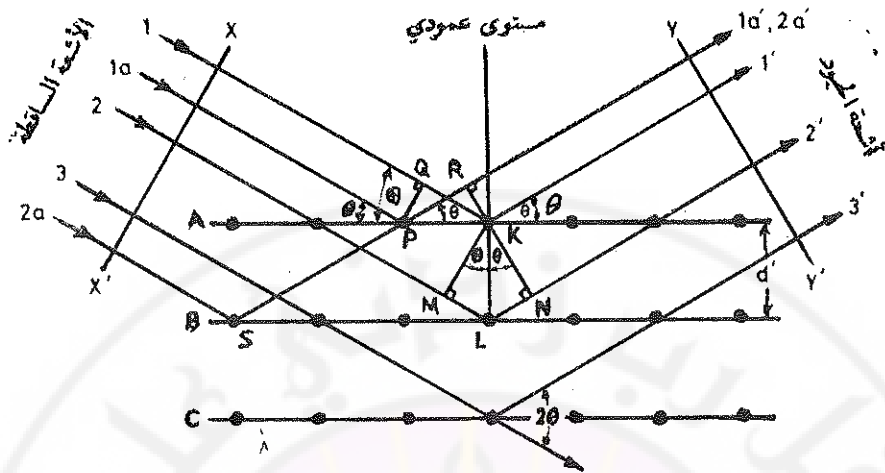
تتم دراسة البنية الذرية للمادة باستخدام الأشعة، والتي هي عبارة عن موجات كهرومغناطيسية ذات الموجات القصيرة التي يتراوح طول موجاتها بين  $0.02 \times 10^{-8} - 2 \times 10^{-8} \text{ cm}$ . ويعتمد تحليل البنية باستخدام الأشعة السينية على ظاهرة حيود الأشعة السينية عند سقوطها على الصفوف الذرية المتتالية

في الجسم البلوري. تنتشر الذرات بالأشعة الساقطة عليها ثم تتداخل الموجات المشتتة الصادرة عن الذرات المختلفة. وتجري الظواهر المعقدة لتداخل الأشعة السينية المشتتة على ذرات الجسم البلوري بحيث يظهر الأمر كما لو كانت هذه الأشعة قد انعكست عن المستويات الذرية المتوازية للبلورة ( الشكل 4-13 ). غير أن هذا الانعكاس عن مجموعة المستويات المتوازية لا يحدث إلا عند زوايا السقوط التي تحقق معادلة وولف-براج التالية:

$$2 d \sin \theta = n \lambda$$

حيث  $d$  - المسافة بين المستويات الذرية المتوازية المتجاورة؛  
 $\theta$  - زاوية سقوط الأشعة على المستوي الذري؛  
 $\lambda$  - طول موجة الأشعة السينية؛  
 $n$  - عدد صحيح ( يسمى رتبة الانعكاس ).

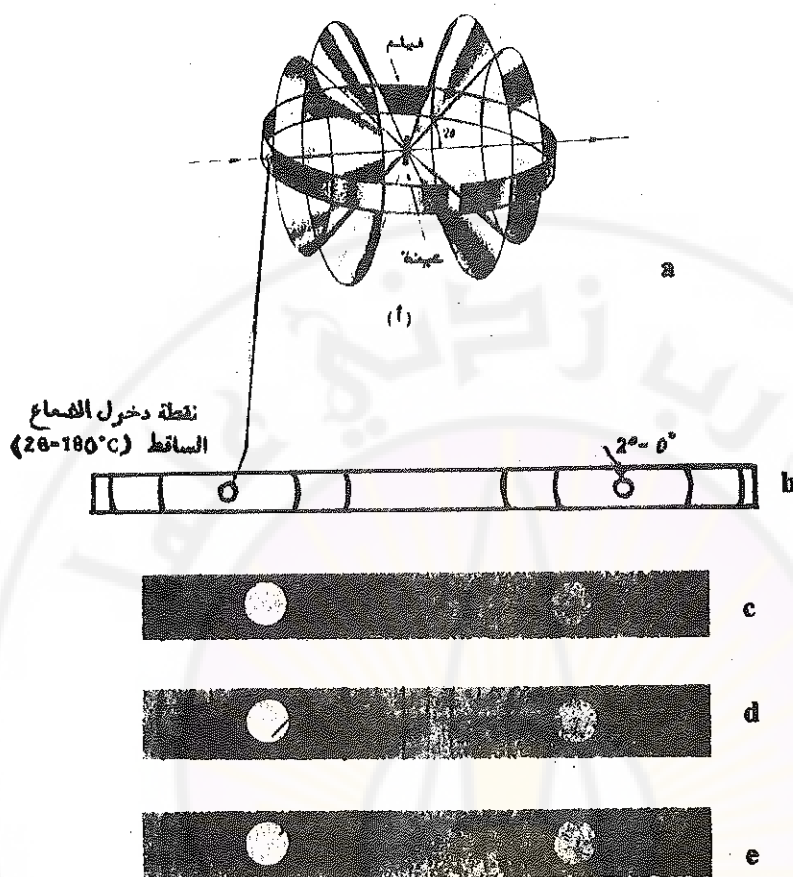
كثيراً ما تستخدم لدراسة البنية البلورية للمادة طريقة دبي-شيرار. وتتلخص طريقة الحصول على صور بالأشعة السينية للعينات متعددة البلورات فيما يلي ( الشكل 4-14 ): يسقط الشعاع الضيق من الأشعة السينية الوحيدة الطول الموجي على العينة الجارية دراستها. تتكون هذه العينة من عدد ضخم من البلورات التي تتباين في اتجاهاتها بالنسبة للأشعة السينية الساقطة. ويوجد دائماً في هذه البلورات عدد هائل من المستويات الذرية التي تقابل الأشعة بزوايا انعكاس  $\theta$  تحقق معادلة وولف-براج. وتشكل الأشعة المنعكسة عن مجموعات المستويات المتماثلة في البلورات المختلفة ما يسمى بمخروط الانعكاس الذي ينطبق محوره على امتداد الشعاع الساقط، وتساوي زاوية رأس هذا المخروط  $2\theta$ . ينشأ انعكاس الرتبة الأولى عن المستويات التي تزيد المسافة بين مستوياتها المتجاورة المتوازية عن نصف طول الموجة (  $d > \lambda / 2$  ).



الشكل 4-13

انعكاس الأشعة السينية عن المستويات الذرية

تكون هذه المخروطات مستمرة إذا كان عدد البلورات العاكسة كبيراً. فإذا وضعنا على مسافة ما من العينة فيلماً حساساً تتكون عليه مجموعة من الدوائر المتحدة المركز التي تعبر عن مقاطع مخروطات الانعكاس بمستوي الفيلم الحساس. وعادة ما يتم تسجيل الصور المأخوذة بالأشعة السينية للعينات متعددة البلورات على شريط الفيلم الذي يوضع ملاصقاً للسطح الأسطواني لآلة التصوير. وتتكون على الفيلم سلسلة من أزواج الأقواس المتماثلة ويبين الشكل 4-14 أشكال الفيلم لبعض المواد.



الشكل 4-14

مبدأ طريقة دبي-شيرار للحصول على صور بالأشعة السينية

- (a) مخروط الانعكاس
- (b) شكل الفيلم بعد وضعه أفقياً
- (c) شكل الفيلم الناتج للنحاس ( مكعب متمركز وجهياً )
- (d) شكل الفيلم الناتج للتنتغستين ( مكعب متمركز حجماً )
- (e) شكل الفيلم الناتج للزنك ( مسدس عالي الحشو )

وبتيسيح تعيين عدد الأقواس على هذه الأفلام ومواقعها النسبية وشدة إسودادها إمكانية تحديد مواقع الذرات في الأجسام البلورية وحساب المسافة بينها. ولا يقتصر تحليل البناء البلوري باستخدام الأشعة السينية على تحديد البنية الذرية البلورية للمادة بل يتعدى ذلك إلى تحديد التغيرات التي تطرأ على هذه البنية نتيجة للمعالجات المختلفة التي تجرى للمادة.

#### 4 - 5 الطرق الفيزيائية لدراسة المادة:

يحدد التركيب الطوري وبنية المادة الخواص الفيزيائية لهذه المادة، لذلك يمكن عن طريق دراسة التغيرات في الخواص الفيزيائية الحكم على التحولات التي تحدث في السبائك.

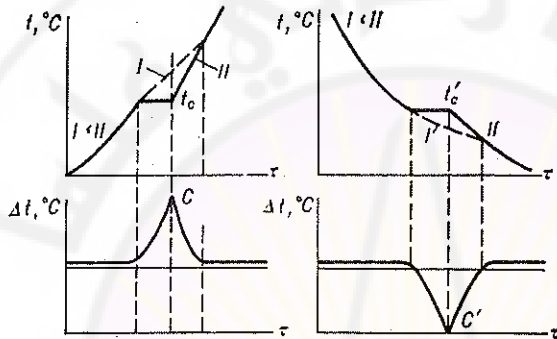
#### 4 - 5 - 1 طريقة التحليل الحراري:

ترافق التحولات الطورية في المعادن بانطلاق أو امتصاص للطاقة الحرارية، وعند قياس الآثار الحرارية هذه يمكن تحديد زمن حدوث التحولات الطورية وتعيين درجات الحرارة المناظرة لها.

ولإجراء التحليل الحراري تسخن عينات من المعدن المطلوب دراسته (أو تبرد) ثم تسجل التغيرات التي تطرأ على درجة حرارة المعدن مع الزمن. ويتم تعيين نقاط الانكسار والتوقفات الحرارية (المستقيمات الأفقية) على منحنيات التبريد أو التسخين (الشكل 4-15). وترتبط التغيرات عند هذه النقاط بالآثار الحرارية لهذه التحولات.

تستخدم لزيادة دقة تعيين درجات حرارة التحولات الطورية في الحالة الصلبة طريقة التحليل الحراري التفاضلي، حيث نقوم بتعيين الفرق في درجات الحرارة بين المعدن الجاري دراسته وبين عينة معدنية قياسية لا تمر بأية تحولات طورية أثناء تسخينهما معاً في نفس الظروف (الشكل 4-15). وتناظر

الأجزاء الأفقية على منحنيات " درجة الحرارة-الزمن " أثناء التسخين والتبريد درجات حرارة التحول  $t_c$  و  $t'_c$  . أما على منحنيات " فرق درجات الحرارة - الزمن " فإن نقاط الذروة  $C$  و  $C'$  تعبر عن نهاية التحول.



الشكل 4-15

طريقة التحليل الحراري

I - العينة القياسية، II - العينة الجاري فحصها

#### 4 - 5 - 2 الطريقة التمددية:

تقوم هذه الطريقة على مبدأ تغير حجم المعادن أو السبائك أثناء التحولات الطورية، فعند بلوغ درجات الحرارة الحرجة يعتمد تغير طول العينات بقدر كبير على التحولات الطورية التي تحدث في السبيكة. فيحدث في هذه اللحظة تمدد حاد أو انكماش مما يؤدي إلى انحراف منحنى التمدد عن



مساره بصورة فجائية إلى الأسفل أو إلى الأعلى. وتراقب التغيرات من خلال العلاقة بين مقدار استطالة العينة ودرجة حرارتها أو العلاقة بين الفرق في استطالة العينة المدروسة وعينة قياسية وبين درجات الحرارة. وتستخدم لتسجيل التغيرات حتى الطفيفة منها التي تطرأ على أطوال العينات العديد من الطرق وأجهزة قياس التمدد الطولي الميكانيكية والضوئية والكهربائية وغيرها.

#### 4 - 5 - 3 طريقة قياس المقاومة الكهربائية:

تأثر التحولات الطورية وتغير تركيب الشبكة بشكل كبير على مقاومتها الكهربائية، ويمكن تعيين النقاط الحرجة عن طريق رسم ودراسة منحنيات "المقاومة الكهربائية - درجة الحرارة". وتبين نقاط الإنكسار على المنحني درجات حرارة التحولات الطورية. تُقاس المقاومة الكهربائية باستخدام جسر هويستون أو طريقة طومسون أو بطرق قياس فرق الجهد.

#### 4 - 5 - 4 طريقة إقفاء أثر النظائر المشعة:

تستخدم هذه الطريقة لمراقبة توزيع العناصر المختلفة في السبائك ودراسة عمليات الانتشار وغيرها. وتعتمد هذه الطريقة على التطابق في الخواص الفيزيائية والكيميائية بين المادة المستقرة والنظير المشع. ويعتبر خليط هاتين المادتين ( المشعة والمستقرة ) غير قابل للتمايز من وجهة نظر كيميائية. ويمكن متابعة حركة ذرات النظير المشع عن طريق تسجيل ما تطلقه من إشعاعات التي تسبب تأيناً في المادة الأم، يمكن عن طريقه الحكم على شدة التحلل الإشعاعي. يتم الحصول على النظائر المشعة بطرق صناعية نتيجة للتفاعلات النووية ويُقاس مدى نشاط النظائر المشعة إما في وحدات كوري أو في وحدات الرزرفورد. وعادة تستخدم النظائر المشعة التي تبلغ فترة نصف العمر لها عدة أيام.

لإجراء التجارب، تضاف النظائر المشعة إلى المادة المطلوبة دراستها أثناء عملية الصهر. وتستخدم لتسجيل النشاط الإشعاعي الطرق التصويرية حيث أن الأشعة الناتجة عن النشاط الإشعاعي تؤثر على الألواح الحساسة وتؤدي إلى اسودادها. فإذا وضعت العينة المحتوية على نظير إشعاعي على لوح حساس ثم أظهر هذا اللوح فإنه تظهر عليه مناطق قائمة تناظر في توزيعها توزيع المادة المشعة في العينة. يمكن عن طريقها الحكم على مواقع ذرات المادة ذات النشاط الإشعاعي. كما تستخدم أيضاً لتسجيل النشاط الإشعاعي الطرق الكهربائية التي تعتمد على ظهور التيار الكهربائي بين قطبين منفصلين تحت تأثير النشاط الإشعاعي.

## الفصل الخامس

### اختبارات كشف عيوب المادة

- 5 - 1 طريقة الاختبار باستخدام السوائل الكاشفة
- 5 - 2 طريقة الاختبار باستخدام أشعة الليزر
- 5 - 3 طريقة الاختبار باستخدام الأشعة النافذة
- 5 - 4 طريقة الاختبار باستخدام الحقل المغناطيسي
- 5 - 5 طريقة الاختبار باستخدام التيارات الإعصارية
- 5 - 6 طريقة الاختبار باستخدام الأمواج فوق صوتية
- 5 - 7 ملخص لطرق الاختبارات غير المتلفة واستخداماتها



## اختبارات كشف عيوب المادة

### ( الاختبارات غير المتلفة NDT )

### Non Destructive Testing

الاختبارات غير المتلفة هي الاختبارات التي تجرى على المواد دون أن تحدث فيها أي تأثير ضار ولا تغير في أبعاد المادة أو مواصفاتها. وتجرى هذه الاختبارات للكشف عن الأخطاء أو العيوب السطحية والداخلية التي يمكن أن توجد في عناصر الآلات والمعدات والمنشآت المعدنية وغيرها. هناك الكثير طرق الاختبارات غير المتلفة حيث تمتاز كل طريقة بمزايا خاصة بها ويعتمد في اختيار الطريقة الأكثر ملائمة لاختبار منتج ما على خبرة القائم على الاختبار ومعرفته الجيدة بمزايا الطرق وبالعيوب التي يمكن تصادف. فيما يلي شرح لأكثر الطرق انتشاراً:

#### 5 - 1 طريقة الاختبار باستخدام السوائل الكاشفة:

تستخدم هذه الطريقة في الكشف عن التشققات والكسور المفتوحة على السطح والتي لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة من مرتبة الميكرومتر. تعتمد طريقة الاختبار هذه على الخاصية الشعرية لسوائل ملائمة وفعالة (إجهادها السطحي صغير) والتي يمكن أن تتغلغل في أماكن انقطاع السطح المراد اختباره في المادة، وبعد إزالة الفائض من السائل الفعال عن سطح العينة فإن قوى الخاصية الشعرية تظهر مكان التشقق.

يتم إجراء الاختبار بوضع الصبغة في سائل مناسب مثل الزيت والكبروسين ثم توضع هذه الصبغة على سطح المادة وتسري عندئذ الصبغة في

التشققات الموجودة على سطح المادة المختبرة، وبعد جفاف المادة المفحوصة يدهن السطح بطباشير أبيض مصنوع من كربونات الكالسيوم. وعندما يبدأ السائل في الجريان من داخل المادة إلى سطحها فإنه يلاقي السطح المظموس بمادة الطباشير، وتقل كثيراً نسبة اللون الأبيض في منطقة الشقوق نتيجة تلوثها بالزيت المتواجد في الشقوق. تتأثر دقة النتائج بحالة السطح، لذلك لابد أن يعد السطح إعداداً جيداً من حيث التنظيف وإزالة أية مواد دهنية عليه وتجفيف السطح قبل إجراء عملية الاختبار.

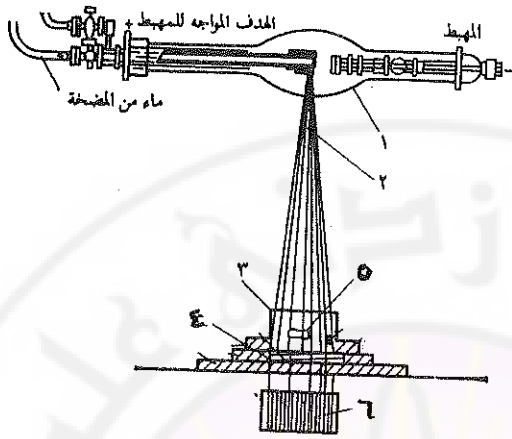
تستخدم حديثاً أصباغ فلورية وأصباغ ذات ألوان مميزة. تذاب الأصباغ ذات الألوان المميزة في محلول ذي قوة اختراق عالية، ثم يتم الفحص بعد التظهير في الضوء الأبيض. أما عند استخدام الأصباغ الفلورية فيتم الفحص في غرفة مظلمة باستخدام الأشعة فوق البنفسجية. ويجب إعطاء الوقت الكافي للصبغة لكي تخترق المادة قبل إزالة الزائد منها من على سطح المادة، وقبل إجراء التظهير. ويقوم المظهر بسحب الصبغة من العيوب السطحية بعامل الإذابة والتنشيف ثم تظهر هذه السوائل في الضوء العادي أو الأشعة فوق البنفسجية.

## 5 - 2 طريقة الاختبار باستخدام أشعة الليزر:

تقوم هذه الطريقة على أساس استخدام أشعة الليزر التي تسقط على المادة معطية صورة ثلاثية الأبعاد، وينعكس شعاع الليزر من السطح المراد فحصه ويمكن مشاهدته بالعين أو يسجل على فيلم. ويتم تطبيق الصورة الناتجة على الشكل الأصلي. ويجرى الاختبار بوضع الجزء المراد فحصه تحت الإجهادات، حيث تساعد تلك الإجهادات في إظهار أية عيوب في المادة.

### 5 - 3 طريقة الاختبار باستخدام الأشعة النافذة:

يستخدم هذا النوع من الاختبارات لإظهار العيوب الداخلية ( مثل الفقاعات الغازية والفجوات والشقوق وغيرها ) في المسبوكات والوصلات الملحومة وغيرها. ويتم الاختبار باستخدام الأشعة السينية أو أشعة  $\gamma$  الناتجة عن التحلل الإشعاعي للنظائر المشعة الصناعية. ويبين الشكل 1-5 رسماً تخطيطياً للاختبار الإشعاعي لكشف العيوب الداخلية للمادة. توجه الأشعة نحو المادة المراد اختبارها والتي توجد خلفها وسيلة لتسجيل شدة الأشعة النافذة من المادة. تمتص المادة بعضاً من الأشعة الساقطة عليها وتنفذ بعضها الآخر. فإذا اشتملت المادة على عيوب داخلية فإن امتصاصها للأشعة يختلف من نقطة إلى أخرى في مقطعها. وتقوم وسائل التسجيل بتسجيل تلك الفروق مما يتيح الحكم على أبعاد وخصائص العيوب. ويؤدي وجود الفجوات والفقاعات الغازية والشقوق وما يماثلها في المادة إلى تعرض الأشعة النافذة خلالها للإضعاف بصورة أقل، بالتالي يزيد تأثيرها على الألواح الحساسة ( الفيلم ) بالمقارنة بالأماكن الخالية من العيوب. ويظهر العيب على الفيلم بعد إظهاره على شكل بقع قاتمة. تبدو الفقاعات الغازية في المادة على الصور المأخوذة بالأشعة السينية على شكل بقع قاتمة ذات محيط حاد، أما الكتل الخبيثة في المسبوكات فتظهر على شكل بقع قاتمة بدون محيط. تظهر الشقوق في الصور على شكل خطوط منكسرة قاتمة. يمكن استخدام أجهزة الأشعة السينية القياسية التي يبلغ أقصى جهد فيها 200 كيلو فولت للكشف عن العيوب في القطع الفولاذية التي يبلغ سماكها 70 mm وفي القطع من سبائك الألمنيوم التي يبلغ سمكها 325 - 375 mm أو في القطع النحاسية التي يبلغ سماكها 40 - 50 mm. ولدراسة العيوب الداخلية في القطع ذات السماكات الكبيرة تستخدم أشعة  $\gamma$  التي تتيح دراسة المادة حتى سمك 250 - 300 mm .



الشكل 1-5

رسم تخطيطي لجهاز كشف العيوب بالأشعة السينية

1. أنبوب الأشعة السينية
2. حزمة الأشعة
3. المادة المدروسة
4. لوح حساس
5. فجوة في المادة
6. الصورة الشعاعية



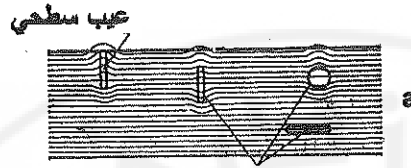
#### 5 - 4 طريقة الاختبار باستخدام الحقل المغناطيسي:

تعد هذه الطريقة واحدة من الطرق المستخدمة في الكشف عن التشققات والعيوب الموجودة مباشرة على سطوح المواد ذات الخواص المغناطيسية ( مثل الحديد الصلب والفولاذ وبعض سبائك النيكل ) أو الواقعة على بعد 2 - 3 mm تحت السطح. يجرى اختبار قطع الآلات أثناء صناعتها وكذلك أثناء الصيانة واختبار اللحامات والمحاور. وتقوم هذه الطريقة على وضع طبقة رقيقة من مسحوق أكسيد الحديد الذي يتراوح قطر دقائقه 5 - 10 ميكرون على سطح القطعة المراد اختبارها ويتم في نفس الوقت تطبيق حقل مغناطيسي ذي شدة كافية وباتجاه مناسب عليها. تتحرف خطوط الحقل المغناطيسي عن مسارها الطبيعي داخل القطعة في أماكن وجود التشققات أو الشوائب ذات الطبيعة اللامغناطيسية أو أماكن وجود الفراغات الهوائية مما يؤدي إلى ظهور حقل مغناطيسي متسرب ونشوء مغناط موضعية قادرة على جذب دقائق مسحوق أكسيد الحديد. ويمكن معرفة أماكن وشكل وأبعاد العيوب من خلال تفحص شكل انتشار مسحوق أكسيد الحديد على سطح المادة. ويبين الشكل 5-2 طريقة الاختبار المغناطيسية وشكل الحقل المغناطيسي.

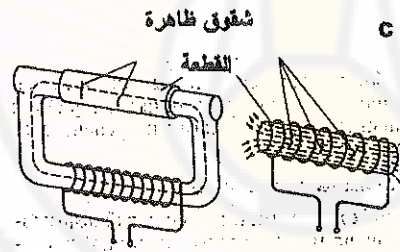
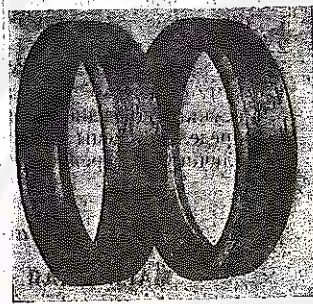
تمتاز طريقة كشف العيوب باستخدام الفحص المغناطيسي بما يلي:

- أ- تقنية بسيطة ولا تستغرق زمناً طويلاً للحصول على النتائج ويمكن نقل معدات هذه الطريقة إلى مكان الاختبار نتيجة خفة وزنها.
- ب- يمكن التعرف على الشوائب الدخيلة التي تحتويها المادة وكذلك يمكن الكشف عن التشققات أو التصدعات في المادة المختبرة، وكذلك إمكانية الكشف عن العيوب الموجودة تحت السطح مباشرة وإمكانية تصوير النتائج على صورة ضوئية وحفظ سجل دائم للعيوب.

ت- إمكانية الحصول على نتائج مقبولة في حال وجود هلاء خفيف على السطح بدون تأثير على جودة النتائج وذلك لعدم حاجة سطح المادة المختبرة إلى تجهيز خاص.



عيوب داخلية



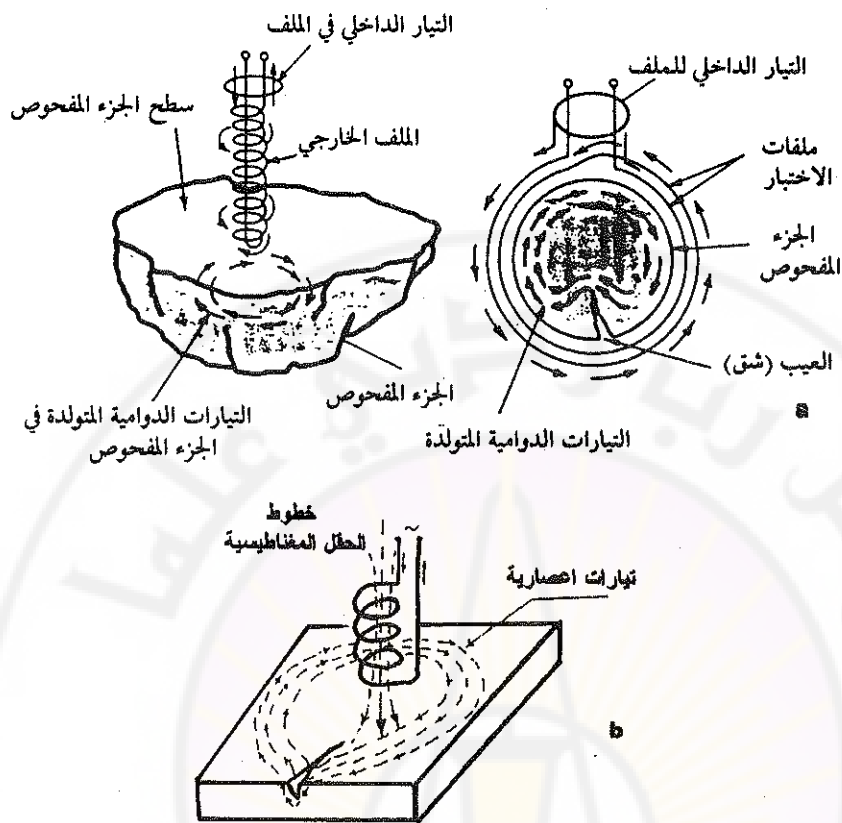
## الشكل 5-2

طريقة الاختبار باستخدام الجسيمات المغناطيسية

(a) شكل الحقل المغناطيسي، (b) حلقات محمل تظهر فيه التشققات باختبار الجسيمات المغناطيسية، (c) طرق إنشاء الحقل المغناطيسي في المادة المختبرة

## 5 - 5 طريقة الاختبار باستخدام التيارات الإعصارية:

تستخدم هذه الطريقة في الكشف عن التشققات والفراغات وعدم التماثل في البنية الكيميائية أو في الخواص الفيزيائية في جميع المواد المعدنية. تقوم طريقة الاختبار باستخدام التيارات الإعصارية على وضع ملف يغذيه تيار متناوب بالقرب من سطح المادة الناقلة المراد اختبارها مما يؤدي إلى تولد تيارات إعصارية فيها نتيجة لفعل التحريض الكهرومغناطيسي كما هو مبين في الشكل 3-5. وترتبط شدة لتيارات الإعصارية المتحرضة بمقدار شدة التيار الكهربائي المار في الملف المحرض بقيمة تردد هذا التيار وبالناقلية الكهربائية للمادة المختبرة وبنفاذيتها المغناطيسية وبشكل سطحها والعيوب المتواجدة فيها. تتركز التيارات الإعصارية في المادة المختبرة بالقرب من السطح وتتناقص قيمة هذه التيارات بشكل أسي مع ازدياد عمق النفوذ وتقوم التيارات الإعصارية المتحرضة بنشر حقل مغناطيسي معاكس للحقل المغناطيسي الأصلي مما يؤدي إلى إحداث تغير في قيمة الممانعة الكهربائية للملف الفاحص وتخلخل توازن الدارة الكهربائية بجسر واطسطن المتواجد فيها. ويتم قبل البدء باختبار المادة تحقيق توازن الدارة الكهربائية ( جسر واطسطن ) وذلك بوضع الملف الفاحص على تماس مباشر مع سطح المادة المراد اختبارها على أن يتم التماس في مكان خالي من العيوب. يتم الاختبار بتحريك الملف الفاحص على سطح المادة وتغيير ممانعة الملف في المواضع الحاوية على عيوب نتيجة لتشوه مسارات التيارات الإعصارية وتغير مقدار الترابط الكهرومغناطيسي بين الملف والمادة المختبرة. وبقياس مقدار تغير مطال وطور ممانعة الملف يمكن معرفة نوع العيب وشكله ومكان وجوده.



الشكل 3-5

مبدأ الاختبار بالتيارات الإعصارية

a- مبدأ الطريقة، b- انتشار التيارات الإعصارية في مناطق العيوب

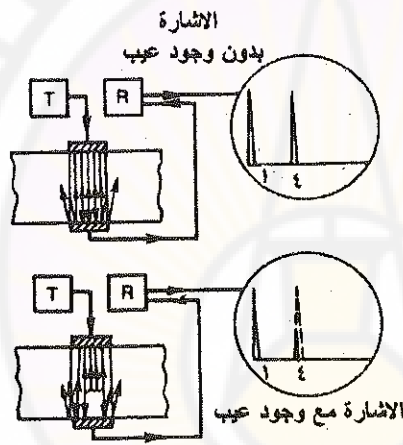
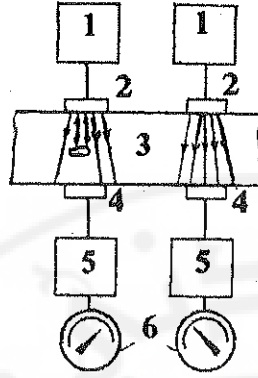
## 5 - 6 طريقة الاختبار باستخدام الأمواج فوق صوتية:

الأمواج فوق الصوتية هي الأمواج ذات الترددات الأعلى من الترددات التي يمكن لأذن الإنسان أن تسمعها أو تتحسس بها، حيث تتحسس أذن الإنسان الترددات الواقعة بين 20 - 20000 هرتز. يمكن استخدام الأمواج فوق الصوتية في فحص واختبار البنية الداخلية للمواد والكشف عن وجود العيوب فيها خلال مراحل صناعتها المختلفة، كما يمكن استخدامها في فحص المواد والأجزاء الخاضعة للإجهادات أو التآكل في المنشآت الصناعية أثناء العمل.

تقوم هذه الطريقة على تمرير أمواج فوق صوتية ذات تردد بين 0.25 - 25 MHz في المادة المراد اختبارها وذلك بواسطة مجس مرسل ومستقبل موضوع على تماس مباشر مع المادة. وتحدد العيوب بالاعتماد على قدرة الأمواج فوق الصوتية على الانعكاس عن سطوح العيوب الداخلية. تتولد الأمواج فوق الصوتية اللازمة لهذه الطريقة بتطبيق نبضات كهربائية ذات تردد واقع ما بين 0.25 - 25 MHz على شريحة من مادة الكوارتز مما يؤدي إلى اهتزاز هذه الشريحة وتغير أبعادها نتيجة التمدد والتقلص وفقاً لتردد نبضات الجهد المتناوب المطبق عليها. يمكن تمييز طريقتين أساسيتين لإجراء هذا الاختبار: طريقة الظلال وطريقة الصدى.

### طريقة الظلال:

تعتمد هذه الطريقة على أساس إضعاف شدة الذبذبات فوق الصوتية السافذة خلال المادة في أماكن وجود العيوب، وفي حال عدم وجود عيوب تنفذ الموجات فوق الصوتية خلال المادة دون عائق ( الشكل 5-4 ). يؤدي وجود العيوب إلى انعكاس قدر من طاقة الأمواج فوق الصوتية مما يضعف من شدة المجال التذبذبي لها. ويظهر ذلك في انخفاض في قراءة مبين جهاز تسجيل شدة الذبذبات السافذة من المادة.



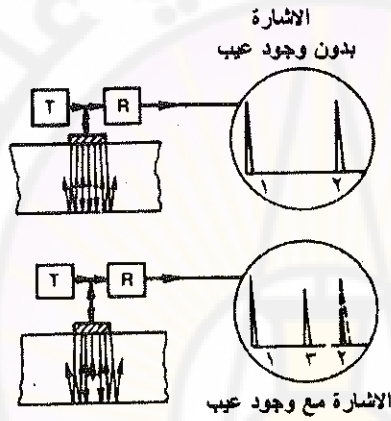
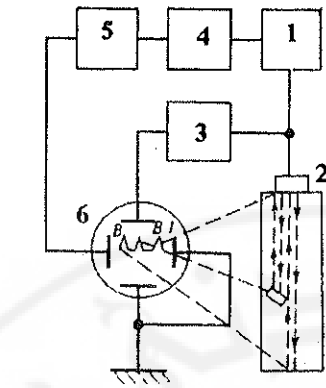
الشكل 4-5

الكشف عن العيوب بطريقة الظلال

1. مولد الذبذبات، 2. الرأس الباحث، 3. المادة المدروسة، 4. المستقبل، 5
- . المولد الماسح، 6. أنبوب الأشعة المهبطية.

### طريقة الصدى:

تقوم هذه الطريقة على إرسال نبضات ذبذبية قصيرة مرنة داخل المادة واستقبال إشارات الصدى المرتد. ويعمل جهاز كشف العيوب كما يلي ( الشكل 5-5): يقوم المولد بإرسال موجات كهربائية إلى المحول الكهربائي الموجود بالمجس، الذي يقوم بإرسال نبضات ذبذبية مرنة داخل المادة. تصل النبضة المرنة إلى الوجه المقابل فتنعكس عنه وترتد إلى المجس الذي يحول جزءاً من الطاقة النبضية المرتدة إلى نبضة من الجهد الكهربائي يقويها جهاز الاستقبال ثم تصل إلى أنبوب الأشعة المهبطية مؤدية إلى انحراف الشعاع في الاتجاه الرأسي. وفي نفس الوقت الذي يرسل فيه المولد ذبذبه يقوم المؤقت بتشغيل المولد الماسح الذي يحرف الشعاع الإلكتروني في الاتجاه الأفقي. تسجل الإشارة الابتدائية المناظرة للحظة إرسال النبضة في المادة المختبرة في الجزء الأيسر من شاشة أنبوب الأشعة المهبطية. وتزاح إشارات الصدى المرتدة عن الوجه المقابل للمادة بالنسبة للإشارة الابتدائية بمسافة تتأخر الفترة الزمنية اللازمة لمرور الموجات إلى الوجه المقابل للمادة وبالعكس. وفي حال وجود عيب، فإن إشارة الصدى الصادرة عن العيب تصل إلى المجس مبكراً، وتظهر على الشاشة بين وضع النبضة الابتدائية والنبضة المرتدة عن الوجه المقابل للمادة. عند إجراء الاختبار يتحرك المجس بطول سطح المادة المغطاة بطبقة من الزيت. ويمكن في هذه الحالة، إما متابعة الإشارة على شاشة أنبوب الأشعة المهبطية مباشرة أو الاستماع إلى الإشارات الصادرة عن جهاز خاص لإرسال إشارات العيوب.



الشكل 5-5

الكشف عن العيوب بطريقة الصدى

1. مولد النبضات الكهربائية، 2. المجس، 3. المستقبل، 4. المؤقت، 5. المولد الماسح، 6. أنبوب الأشعة المهبطية.



تطبق طريقة الاختبار باستخدام الأمواج فوق صوتية في مجالات كثيرة  
أهما:

1. اختبار سلامة المواد ذات السماكات الكبيرة وخلوها من التشققات والفجوات الداخلية.
2. قياس سماكات المواد بدقة عالية استناداً إلى معرفة سرعة الصوت في المادة.
3. تحديد مواضع التآكل وقياس مقداره في المادة المعرضة للتآكل.
4. تحديد بعض الخواص الميكانيكية للمواد.
5. اختبار جودة اللحامات في المنشآت المعدنية.

5 - 7 ملخص لطرق الاختبارات غير المتلفة واستخداماتها:

| طريقة الاختبار           | متى تستخدم؟                                                                                                                                                                  | أين تستخدم؟                                                                                             |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (a) التـيارات الإعـصارية | 2. قياس اختلافات سمك جدران الأنابيب البرقية أو طبقة التغليف للمادة.<br>3. الكشف عن التشققات الطولية في خطوط اللحام في الأنابيب.<br>4. تحديد نوعية المعالجة الحرارية للمعادن. | - الأنابيب والقضبان.<br>- أجزاء منتظمة الشكل.<br>- الأجزاء المستوية والألواح والأسلاك.                  |
| (b) التصوير الشعاعي      | 1. الكشف عن الثغرات والعيوب الداخلية في المادة.<br>2. الكشف عن أخطاء اللحام.<br>3. قياس الاختلافات في سمك المادة                                                             | - الأوعية المصنعة بالطرق أو الصب أو اللحام.<br>- اختبار حلقية الأنابيب الملحومة.<br>- تقصي حدوث التآكل. |
| (c) السوائل الكاشفة      | 1. تحديد موقع التشققات والمسام السطحية.<br>2. التعرف على                                                                                                                     | - جميع المواد المصنعة بالصب أو بطرق.                                                                    |

| طريقة الاختبار             | متى تستخدم؟                                                                                    | أين تستخدم؟                                                                                |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
|                            | وجود الروابط<br>القوية في اللحام.<br>3. تشققات التعب<br>والصقل.                                | - الأجزاء<br>المشغلة.<br>- الاختبارات<br>الحقلية.                                          |
| (d) الحقل المغناطيسي       | 1. تحديد الثغرات<br>والعيوب السطحية<br>والضحلة.<br>2. الكشف عن<br>العيوب السطحية<br>في اللحام. | - فقط للمواد<br>المغناطيسية.                                                               |
| (e) الأمواج فوق<br>الصوتية | 1. الكشف عن<br>العيوب الداخلية.<br>2. تحديد نوعية<br>التكوين الحبيبي.<br>3. سمك المادة.        | - الألواح<br>والأنابيب<br>والقضبان.<br>- اختبارات ضبط<br>الجودة.<br>- الوصلات<br>اللحامية. |



## الفصل السادس

### الاختبارات الميكانيكية للمواد

- 6 - 1 اختبار الشد
- 6 - 2 اختبار الضغط
- 6 - 3 اختبار الانحناء ( الانعطاف )
- 6 - 4 اختبار الفتل
- 6 - 5 اختبار القص
- 6 - 6 اختبار القساوة ( الصلادة )
- 6 - 7 اختبار الصدم
- 6 - 8 اختبار التعب
- 6 - 9 اختبار الثني
- 6 - 10 اختبار السحب
- 6 - 11 اختبار الزحف

## الاختبارات الميكانيكية للمواد

### Mechanical Testing of Materials

يجب أن تتمتع المواد المستخدمة في الإنشاءات الهندسية بعدد من الخواص المختلفة بحيث نستطيع اختيار المادة المناسبة لكل غرض من الأغراض، وبحيث تتناسب خواصها مع العمل الذي يجب أن تؤديه. تُحدد الخواص الميكانيكية قدرة المواد على مقاومة تغير شكلها وانهيائها عند وقوعها تحت تأثير القوى الخارجية، ومن أمثلة الخواص الميكانيكية المتانة واللدونة. وتتوقف هذه الخواص على نوع المادة وطريقة تشغيلها وبنيتها الداخلية وغيرها. وتُعين الخواص الميكانيكية للمادة باختبار عينات مجهزة خصيصاً لذلك على آلات اختبار خاصة. ويمكن تصنيف اختبارات الخواص الميكانيكية في فئتين: الفئة الأولى هي تلك الاختبارات التي نحصل منها على وحدات قياسية تميز المادة المختبرة ويمكن الاستفادة من هذه الوحدات في الحسابات التصميمية؛ أما الفئة الثانية فهي تلك الاختبارات التي غالباً ما تكون الوحدات المستنتجة منها غير صالحة للاستعمال في الحسابات التصميمية وإنما تقتصر فائدتها على تصنيف المادة من حيث قابليتها أو عدم قابليتها للاستجابة لعملية تكنولوجية ما، وتسمى هذه الاختبارات بالاختبارات التكنولوجية.

## 6 - 1 اختبار الشد Tensile Test:

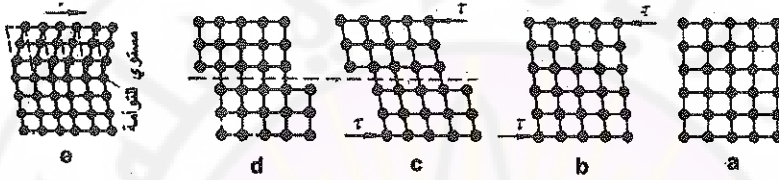
اختبار الشد هو إخضاع عينة من المادة ذات أبعاد معينة إلى حمولة شد استاتيكية أحادية المحور ثم ملاحظة سلوك المادة حتى الانهيار واستنتاج بعض الخواص الميكانيكية. ويحدث في المادة عند تعرضها للشد إجهاد وهو مقدار القوة المطبقة لوحدة المساحة السطحية ويساوي  $\sigma = P/F$  (  $\text{kg/mm}^2$  ) أو يقدر بـ  $\text{N/mm}^2$  ، حيث  $P$  - الحمل أو القوة المؤثرة،  $F$  - مساحة المقطع الأصلي. ويمكن التمييز بين الإجهادات المؤقتة التي تنشأ نتيجة تأثير القوى الخارجية وتخفّي بزوال تأثير هذه القوى وبين الإجهادات الداخلية التي تنشأ وتتزن داخل الجسم نتيجة التوزيع غير المتجانس للتشوهات أو نتيجة التغيرات الحرارية.

تؤدي القوى الخارجية إلى نوعين من التشوه:

أ- التشوه المرن: وهو التشوه الذي يزول تأثيره على شكل وبنية وخواص المادة تماماً بعد زوال تأثير القوى الخارجية. ولا تنشأ عن التشوه المرن أية تغيرات دائمة في بنية أو خواص المادة. وتحدث أثناء الانفعال المرن تحت تأثير القوى ( الانفعال المرن هو نسبة مقدار التغير في الطول إلى الطول الأصلي ) إزاحة طفيفة قابلة للزوال تماماً في أوضاع الذرات أو إزاحة دورانية محدودة في أوضاع الهياكل الشبكية داخل الحبيبات ويؤدي ذلك إلى اختلال في توازن قوى التجاذب والتنافر بين الذرات. لذلك فعند إزالة القوى الخارجية فإن الذرات المزاحة تعود إلى حالة الاتزان تحت تأثير قوى التجاذب أو التنافر وتكتسب البلورات شكلها وأبعادها الأولى.

ب- التشوه اللدن: هو التشوه غير القابل للزوال ويحدث نتيجة تجاوز قيمة الإجهادات الحد المرن. ويمكن أن يحدث التشوه اللدن في البلورات بأحد طريقين إما بالانزلاق أو بالتوأمة. والانزلاق عبارة عن إزاحة الأجزاء المختلفة

للبلورة أحدها بالنسبة للأجزاء الأخرى، ويحدث عندما تصل قيمة الإجهادات في مستوي الانزلاق وفي اتجاه الانزلاق قيمة حرجة معينة.  
يبين الشكل 1-6 رسوماً تخطيطية توضح التشوه المرن واللدن لمعدن ذي بنية تكعيبية تحت تأثير الإجهاد  $\tau$ .



الشكل 1-6

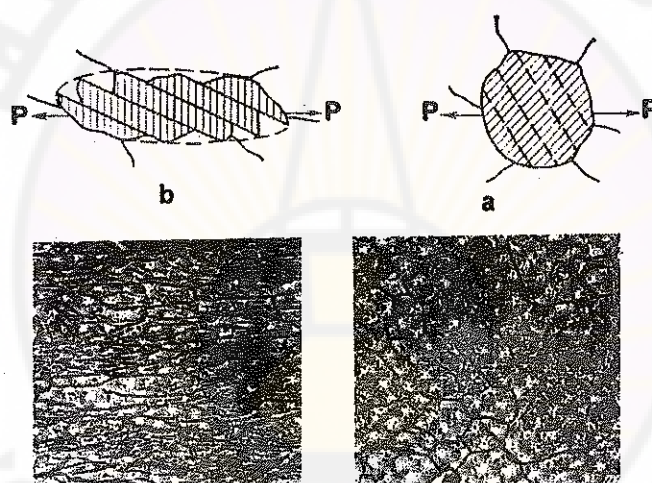
حدوث التشوه المرن واللدن لمعدن ذي نسق بلوري مكعب  
a. البلورة قبل التشوه، b. بعد التشوه المرن، c. بعد التشوه المرن  
واللدن بالانزلاق، d. بعد إزالة الإجهاد بقي التشوه اللدن وزال  
التشوه المرن، e. تكوين التوأمة.

يتمثل التشوه اللدن للعينات المتعددة البلورات من المعادن مع عملية التشوه في العينات ذات البلورة المفردة في كونهما يحدثان إما بأسلوب الانزلاق أو بأسلوب التوأمة. وعند إجراء الفحص المجهرى لعينات معدنية متعددة البلورات عرضت بعد صقلها للتشكيل اللدن فإن آثار الانزلاق تظهر على السطح المصقول على شكل خطوط مستقيمة ذات اتجاه واحد في حدود كل حبيبة على حدة (الشكل 2-6). عند بلوغ درجات عالية من التشوه فإن



الحبيبات تغير شكلها العام الكروي قبل التشوه وتستطيل نتيجة تأثير القوى مكونة بنية ليفية أو طبقية.

تنتهي عملية تشوه المادة باستخدام إجهادات عالية للغاية بانهييار المادة. وتتم مرحلة الانهييار بعمليتين أساسيتين هما تكون الشقوق وانتشارها خلال المادة. وغالباً ما تتكون الشقوق المجهرية من تجمع الانخلاعات المتحركة أمام عائق مما يؤدي إلى تركيز الإجهادات الكافية لتكوين الشق والانهييار. ويكون الانهييار إما مطيلاً أو هشاً (قصفاً). ويصطحب الانهييار المطيل بقدر كبير من التشوه اللدن، بينما لا يتسم الانهييار الهش إلا بقدر ضئيل منه.



الشكل 2-6

تغير شكل حبيبات المعدن نتيجة الانزلاق

a. قبل التشوه، b. بعد التشوه.

### إجراء اختبار الشد:

يُجرى اختبار الشد بصورة عامة على عينات اسطوانية ومسطحة، تخضع أبعاد وشكل العينات إلى مواصفات قياسية حتى يمكن مقارنة النتائج بعضها ببعض؛ ويبين الشكل 3-6 الشكل العام لعينات اختبار الشد. ويسمى الجزء الأوسط من العينة بالجزء العامل ويُحدد عليه الطول الحسابي  $L_0$  ويُؤخذ للعينات الاسطوانية مساوياً:

$$L_0 = 10 D \quad \text{للعينات الطويلة:}$$

$$L_0 = 5 D \quad \text{للعينات القصيرة:}$$

حيث  $D$  قطر الجزء العامل من العينة بالمليمتر. وعند اختبار العينات المسطحة يُحدد الطول الحسابي للعينة من المعادلة:

$$L_0 = 11.3 \sqrt{F_0} \quad \text{للعينات الطويلة:}$$

$$L_0 = 5.65 \sqrt{F_0} \quad \text{للعينات القصيرة:}$$

حيث  $F_0$  مساحة مقطع العينة بالمليمتر المربع. ويبين الجدول 1-6 الأبعاد الرئيسية لعينات الشد.

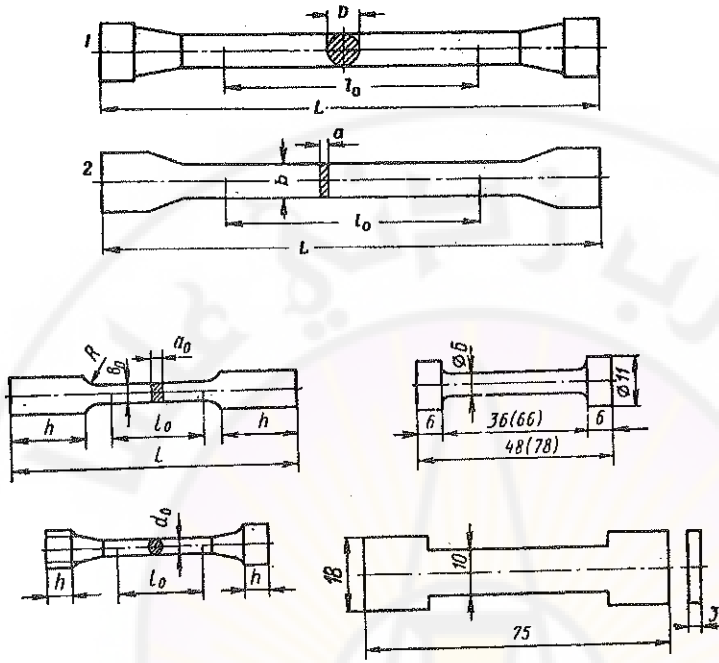
يتم إجراء الاختبار بعد تحضير العينة على آلة اختبار الشد حيث تُثبت العينة بشكل جيد إلى فكيين أحدهما ثابت والآخر متحرك ثم نطبق الحمولة ببطء اعتباراً من الصفر وحتى تحطم العينة. ويكون التحميل إما بشكل ميكانيكي (على آلات الشد الميكانيكية) أو بشكل هيدروليكي (على آلات الشد الهيدروليكية). إن آلات الشد المستخدمة متنوعة الحجم والأشكال. فمنها الصغيرة التي لا تزيد استطاعتها عن بضعة كيلوغرامات وتعمل هذه الآلات يدوياً أو تكون متصلة بمحرك وتستخدم لاختبار المواد ضعيفة المقاومة (مثل الألياف والبلاستيك والجلود والورق)؛ والمتوسطة تصل استطاعتها لبضعة

أطنان؛ والكبيرة التي تبلغ استطاعتها عشرات ومئات الأطنان. وغالباً ما تكون الآلات الصغيرة ميكانيكية و المتوسطة فيمكن أن تكون ميكانيكية أو هيدروليكية أما الكبيرة فهي على الأغلب هيدروليكية التحميل. يبين الشكل 4-6 تخطيطاً لإحدى آلات الشد.

يستمر شد العينة حتى الانهيار والتحطم وخلال مرحلة التحميل يتم وباستمرار قياس القوة المطبقة على العينة كما تقاس استطالة العينة. يتم قياس الاستطالة بعدة طرق، أبسطها وأقلها دقة أن تؤخذ العينة بعد التحطم ويوضع جزءاها إلى جانب بعضيهما ويقاس طول العينة، والفرق بينه وبين الطول قبل الاختبار هو الاستطالة. وللحصول على قياسات أدق للاستطالة تستعمل أجهزة القياس الميكانيكية أو الضوئية المسماة بالتنزومتلات. تستعمل للقياسات الدقيقة للاستطالة أجهزة قياس كهربائية وذلك باستخدام الطابع اللاصق.

الجدول 1-6 أبعاد عينات اختبار الشد

| العينة                                                | الطول الحسابي<br>$L_0$ , mm                      | قطر العينة<br>D, mm | سماعة وعرض<br>العينة mm     |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| العينات الاسطوانية<br>الأساسية:<br>الطويلة<br>القصيرة | 100<br>50                                        | 10<br>10            |                             |
| العينات الاسطوانية:<br>الطويلة<br>القصيرة             | 10 D<br>5 D                                      | 25 - 3              |                             |
| العينات المسطحة:<br>الطويلة<br>القصيرة                | $L_0 = 11.3\sqrt{F_0}$<br>$L_0 = 5.65\sqrt{F_0}$ |                     | $a_0=0.5-25$<br>$b_0=10-30$ |



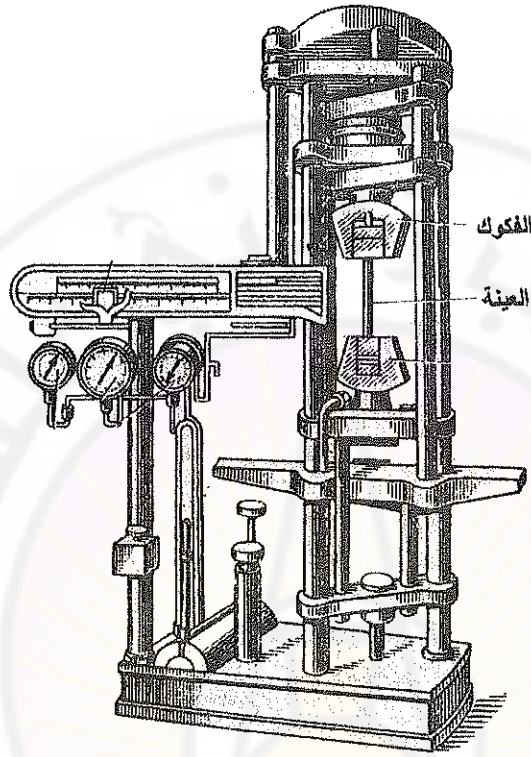
### الشكل 3-6

#### عينات اختبار الشد

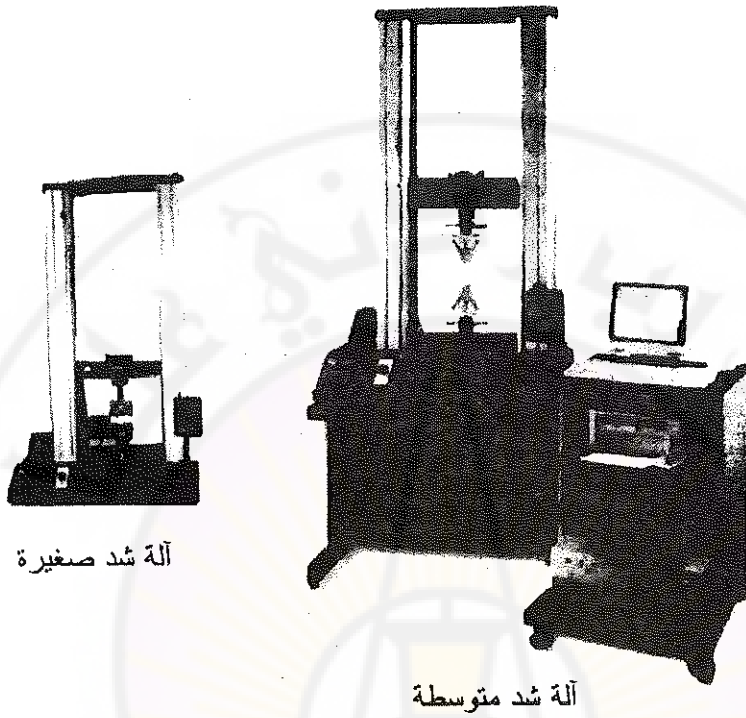
1. عينات اسطوانية، 2. عينات مسطحة.

$L$  - الطول الكلي للعينة،  $L_0$  - الطول الحسابي للعينة،  $D$  - قطر

العينة،  $a$  - سماكة العينة،  $b$  - عرض العينة.



الشكل 6-4-آ  
مخطط آلة اختبار الشد



الشكل 4-6 - ب  
آلات اختبار الشد

تزود آلات اختبار الشد الحديثة بجهاز يسجل الرسم البياني للاستطالة-  
القوة الذي يبين التغيرات التي تطرأ على طول العينة أثناء تغير مقدار التحميل  
المؤثر عليها ( الشكل 5-6 ). يمثل المحور العمودي التحميل  $P$  أما المحور

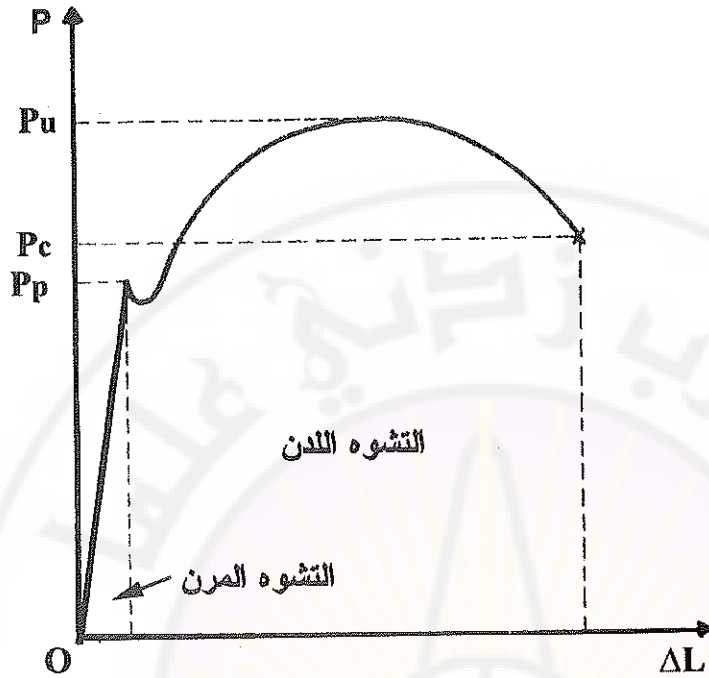
الأفقي فيبين الاستطالة المطلقة للينة  $\Delta L$  . يحتوي المنحي نقاط وأجزاء مميزة وهي: الجزء المستقيم  $OP_p$  حيث تحتفظ الينة على مداه بالتناسب بين الاستطالة والتحميل، وهي علاقة خط مستقيم وقد سميت بمرحلة المرونة لأن الاستطالة تزول بزوال الحمولة ( تشوه مرن )، الجزء الآخر من المنحي يمثل مرحلة اللدونة ( التشوه اللدن ) وتبين علاقة الاستطالة بالحمولة وهي علاقة غير خطية وتتميز بأن الاستطالة في هذه المرحلة لا تزول بزوال الحمولة. تمثل النقطة  $P_u$  أقصى حمولة وهو يناظر الحمل الذي يكون عنده عنق للينة ( تضيق في مقطع الينة ) أما النقطة  $P_c$  فتمثل الحمولة التي تتحطم عندها الينة. تُحدد الإجهادات في النقط الموضحة أعلاه كخارج قسمة الحمل  $P$  المؤثر في لحظة زمنية معينة على المساحة الابتدائية  $F_0$  للمقطع العرضي للينة:

$$\sigma = \frac{P}{F_0} \text{ kg/mm}^2$$

ويبين الشكل 6-6 مخطط الإجهاد - الانفعال الذي يوضح أن التشوه المرن يتناسب مع الإجهاد بشكل خط مستقيم حتى النقطة  $A$  . ويعبر ظل زاوية ميل الخط المستقيم  $OA$  على محور السينات عن معامل مرونة المادة المختبرة الذي يرمز له بـ  $E$  ويحسب من المعادلة:

$$E = \frac{\sigma}{\delta}$$

حيث  $\delta$  - التشوه النسبي ويساوي استطالة وحدة الأطوال من الينة. ولا يعتمد معامل المرونة  $E$  في أغلب الأحيان على بنية العينات بل يتحدد بقوى الترابط بين ذرات المادة.



الشكل 5-6  
مخطط الحمولة - الاستطالة

يسمى الإجهاد المناظر للنقطة A (نهاية الخط المستقيم OA) بحد التناسب ويرمز له  $\sigma_p$  وهو عبارة عن الإجهاد الذي يبلغ عنده مقدار الحيدود عن علاقة الخط المستقيم القدر الذي يجعل قيمة ظل زاوية ميل المستقيم لمنحني التشوه على محور الإجهادات يزيد بمقدار 50% عن قيمته عند الجزء المرن (علاقة الخط المستقيم). وعملياً لا تسبب الإجهادات التي تتجاوز حد التناسب إلا تشوهاً مرناً ولذلك كثيراً ما يعتبر حد التناسب منطبقاً على حد المرونة. يطلق على الإجهاد الذي يؤدي إلى ظهور تشوهٍ متبقٍ قدره 0.2% بحد الخضوع



$\sigma_y$  أو  $\sigma_{0.2}$  . ويستخدم غالباً حد الخضوع كمعيار من المعايير المعبرة عن المتانة. ويعبر المقداران  $\sigma_p$  و  $\sigma_{0.2}$  عن قيمة مقاومة المادة لتأثير الأحمال الصغيرة و المتوسطة. يسمى الإجهاد المناظر لأقصى حمل تتحمله المادة قبل انهيارها بحد المتانة  $\sigma_u$  . وابتداءً من الإجهاد  $\sigma_u$  يتركز التشوه في المادة اللدنة في جزء محدود من العينة حيث يبدأ المقطع العرضي للعينة في التناقص مكوناً ما يسمى بالرقبة.

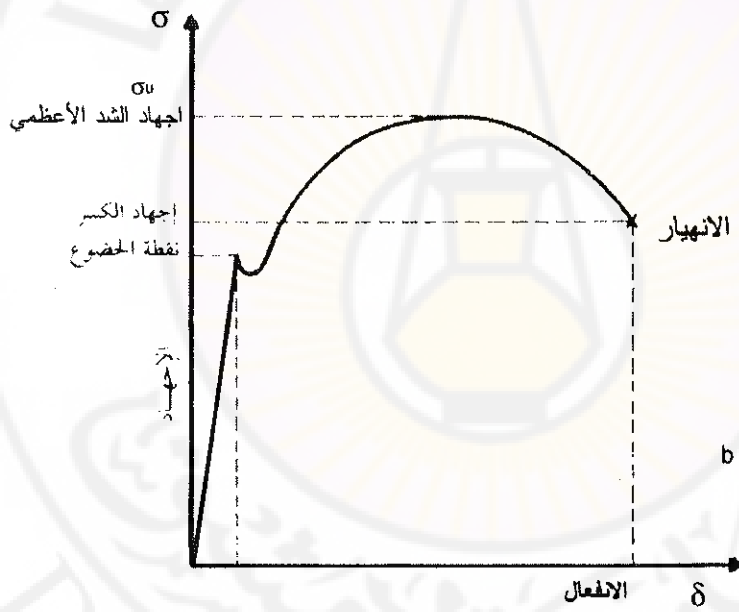
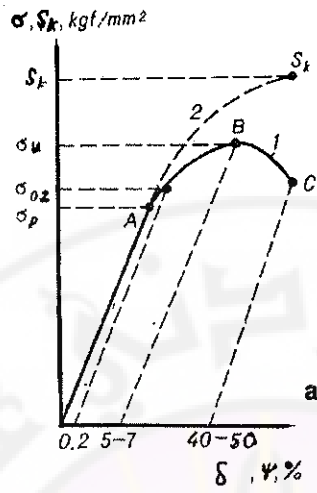
يتيح اختبار الشد إمكانية تعيين الخواص المعبرة عن اللدونة ومنها:  
الاستطالة النسبية:

$$\delta = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \%$$

حيث  $L_0$  طول العينة الأصلي قبل الانهيار ( الطول الحسابي )، و  $L$  طول العينة بعد الانهيار.  
التضيق النسبي للمقطع:

$$\psi = \frac{F_0 - F}{F_0} \times 100 \%$$

حيث  $F_0$  مساحة المقطع العرضي للعينة قبل الانهيار، و  $F$  مساحة المقطع العرضي للعينة بعد الانهيار.



الشكل 6-6

مخطط الإجهاد - الانفعال

a. النظري، b. الحقيقي

## 6 - 2 اختبار الضغط Compression Test:

يتم اختبار الضغط على نفس آلة اختبار الشد، وذلك بوضع عينة الاختبار بين الرأس المتحرك والقاعدة. وعند تحميل العينة بقوة ضغط معينة سوف تُضغَط ويتغير شكلها. تجهز عينات اختبار الضغط بأشكال ثلاث: العينات الطويلة التي يساوي طولها  $L = 8 D$  (حيث  $D$  قطر العينة) وتستعمل لتعيين عامل المرونة؛ والعينات المتوسطة التي يساوي طولها  $L = 3D$  وهي مُعدة للاستعمالات العامة؛ والعينات القصيرة التي يساوي طولها  $L = 0.9 D$  وتستعمل في الحصول على معلومات عن المواد المستخدمة كمساند حيث يكون الاحتكاك الموجود عند قاعدتي العينة مشابهة لحالة تشغيل مواد المساند.

يزداد خلال اختبار الضغط مقطع العينة باستمرار فيما يتناقص طولها والوحدات التي تقاس هنا هي نفس الوحدات التي تقاس في تجربة الشد. ونستطيع من خلال اختبار الضغط تحديد النقطة التي يبدأ عندها الانفعال المتبقي الواضح أي النقطة التي تمثل حد الانسياب في المادة. غير أنه من الصعب تحديد النقطة التي تمثل قوة الضغط أو مقاومة الضغط خصوصاً في المعادن اللدنة وذلك لكون المقطع العرضي للعينة بازدياد مستمر وبالتالي لن تبدأ القوة بالتناقص عند الوصول إلى تلك النقطة. لهذا فإن اختبار الضغط لا يجري عادةً من أجل تحديد مقاومة الضغط إلا للمواد الهشة، أما المواد اللدنة فيجرى اختبارها من أجل معرفة حد الانسياب أو للتعرف على مقاومة المادة للتشكيل.

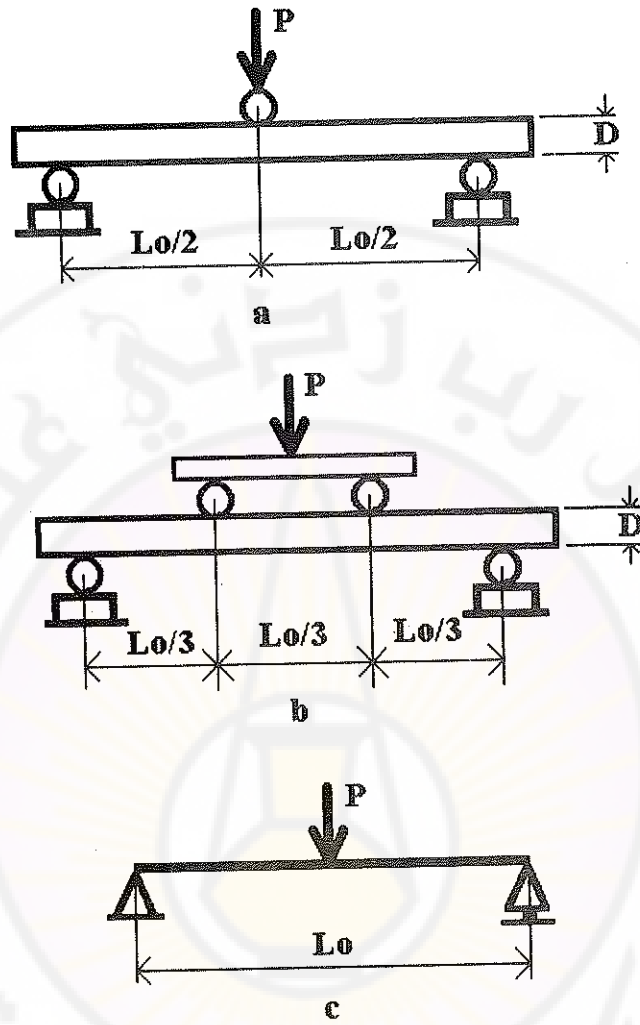
### 6 - 3 اختبار الانحناء ( الانعطاف ) Bending Test :

يُجرى اختبار الانحناء للتعرف على خواص المادة في الانحناء ويتم الاختبار بتطبيق حمولة أحادية في نقطة بمنتصف جأز (  $L_0/2$  ) يرتكز على مسندين أو حمولة مضاعفة في نقطتين بالنسبة لوسط العينة البعد بينهما  $L_0/3$  ( الشكل 6-7 ). ويجرى اختبار الانحناء على آلة الشد العامة حيث توضع العينة على مسندين حرين البعد بينهما  $L_0$  ، وتطبق بعد ذلك الحمولة بواسطة رأس التحميل الذي يكون على شكل يمنع حدوث تركيز الإجهادات في نقاط التماس وسحق لمادة العينة، ويكون عادةً اسطوانتي الشكل. تطبق الحمولة تدريجياً ببطء حتى حدوث الانكسار في المواد الهشة وحتى حدوث أكبر انفعال في المواد اللدنة.

يختلف شكل العينة وأبعادها باختلاف المواد ولكن يجب التقيد بتوصيات المواصفات القياسية. ويجب أن يكون طول العينة أكبر من طول معين حتى يحدث الانهيار بالانحناء وليس بالقص لذلك يجب أن يكون طول العينة مساوياً  $L_0 = 6 - 12 D$  حيث كلما كانت العينة قصيرة كلما كانت قوى القص أكبر تأثيراً في حدوث الانهيار. والوحدات التي تقاس خلال الاختبار هي القوة  $P$  والانحناء ( سهم الانحناء )  $f$  عند منتصف العينة، وترسم في مخطط بياني مماثل لمخطط الشد.

إن قوى القص  $Q$  المؤثرة في المقاطع العرضية للجأز المحمل بقوة في وسطه من المسافة  $x = 0$  إلى المسافة  $x = L_0/2$  هي  $P/2$  ( الشكل 6-8 ). ويكون العزم المؤثر في المقطع الذي يبعد مسافة  $x$  عن المسند هو:

$$M = \frac{P}{2} \times x$$



الشكل 7-6

اختبار الانحناء

a. تحميل في نقطة واحدة، b. تحميل في نقطتين، c. مخطط الاختبار

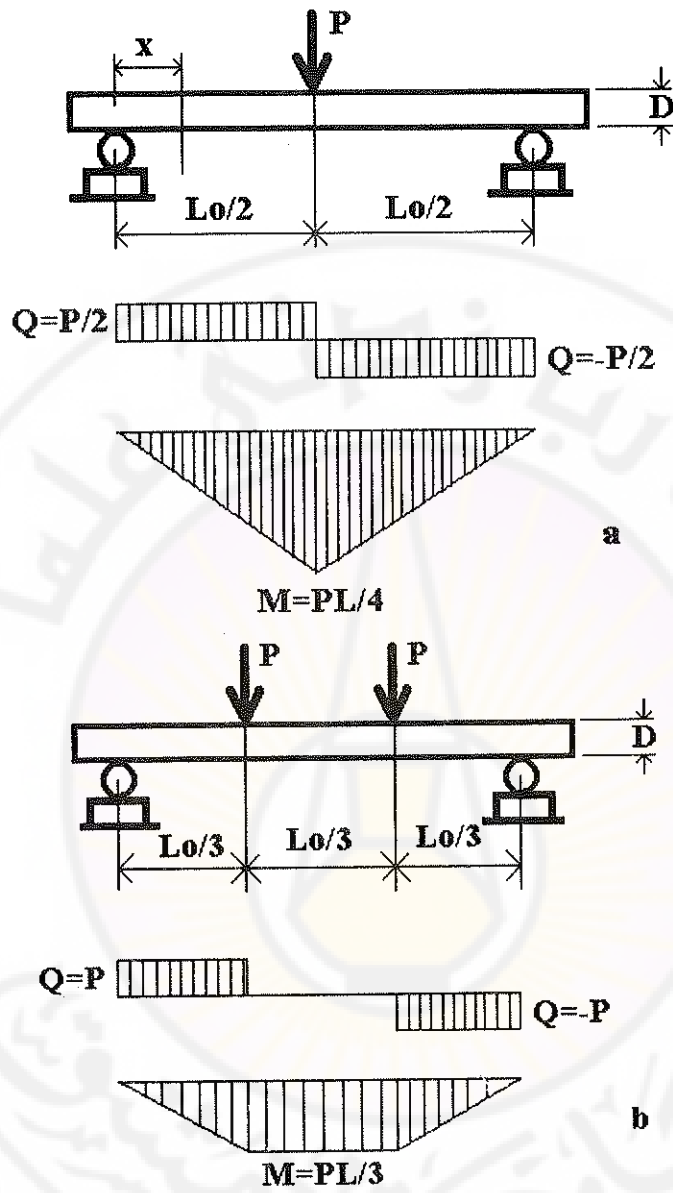
وفي المقطع الأوسط الذي يبعد مسافة  $L_0/2$  عن المسند يبلغ العزم فيه قيمة عظمى تساوي:

$$M = \frac{P}{2} \times \frac{L_0}{2} = \frac{P.L_0}{4}$$

ويوضح الشكل 6-8 قيم ومخططات قوى القص وعزوم الانحناء المؤثرة في المقاطع على طول العينة  $L_0$ .

يؤخذ العزم الأعظمي في حساب الإجهادات باعتباره أكبر العزوم المؤثرة في الجائز إذ يتوزع العزم في المقطع بشكل إجهاد ضغط في الجزء العلوي من العينة وإجهاد شد في الجزء السفلي، ويسمى الخط الفاصل بين مجال الضغط والشد بالخط المحايد ( الشكل 6-9 ) وهو غالباً محور العينة طالما أن الاختبار يجري ضمن مجال حد المرونة للعينة. ويكون الإجهاد معدوماً عند الخط المحايد وأعظماً عند كل من السطحين ويكون التزايد بشكل خطي تبعاً للبعد عن الخط المحايد. وتحسب قيمة الإجهاد الأعظمي عند السطح من المعادلة:

$$\sigma_m = \frac{M_{\max} . h}{I}$$



الشكل 8-6

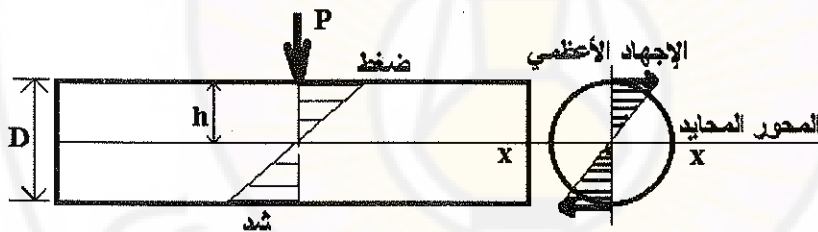
مخططات توزيع قيم قوى القص وعزوم الانحناء  
 a. تحميل في نقطة واحدة، b. تحميل في نقطتين

حيث  $h=D/2$  بعد السطح عن المحور المحايد وللعيونة دائرية المقطع .  
 $I$  - عزم العطالة القطري حول المحور المحايد والمار من مركز السطح.  
ويحسب تبعاً لشكل المقطع العرضي للجائز ( العينة )، ويبين الجدول 2-6  
معادلات حساب عزم العطالة القطري لبعض المقاطع. وبتعويض قيمة  $I$  للمقطع  
العرضي (  $I = \frac{\pi D_0^4}{64}$  ) في علاقة الإجهاد الأعظمي يكون:

$$\sigma_m = \frac{M_{\max} \cdot h}{I} = \frac{M_{\max} \cdot h \cdot 64}{\pi D_0^4}$$

وبتعويض  $M_{\max}$  و  $h$  بقيمهما:

$$\sigma_s = \frac{P \cdot L_0 \cdot h \cdot 64}{4\pi D_0^4} = \frac{8PL_0}{\pi D_0^3}$$

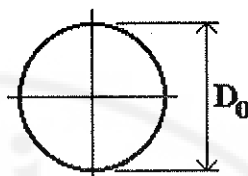
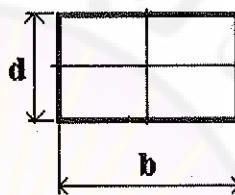
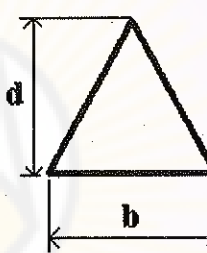
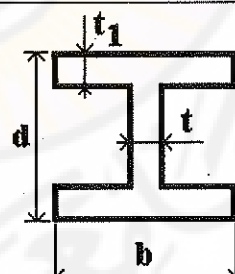


الشكل 9-6

مخطط الإجهاد في مقطع العينة



الجدول 2-6 عزم العطالة القطري

| عزم العطالة                               | شكل المقطع العرضي                                                                   |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $I = \frac{\pi D_0^4}{64}$                |    |
| $I = \frac{bd^3}{12}$                     |    |
| $I = \frac{bd^3}{36}$                     |   |
| $I = \frac{(bd^3) - (b-t)(d-2t_1^3)}{12}$ |  |

أما سهم الانحناء الأعظمي عند تأثير القوة في منتصف العينة فتحدد بالعلاقة:

$$f = \frac{1}{48} \times \frac{FL_0^3}{EI} = \frac{1}{12} \times \frac{\sigma_m L_0^2}{Eh}$$

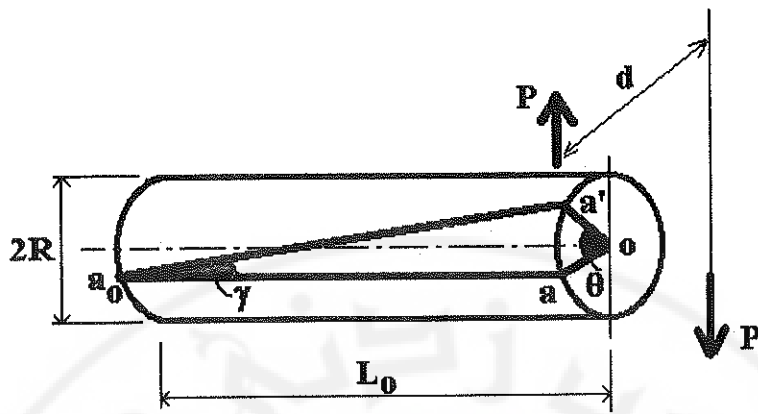
وللمقطع الدائري  $h/2 = D_0$  إذاً:

$$f = \frac{1}{6} \times \frac{\sigma_m L_0^2}{ED_0}$$

يقتصر اختبار الانحناء عادةً على الاختبار أو التحميل حتى حد الانسياب لأن توزيع الإجهادات على المقطع بعد هذا الحد لا يبقى خطياً وينزاح الخط المحايد عن محور العينة.

#### 6 - 4 اختبار الفتل Torsion Test:

يجرى هذا الاختبار في آلات خاصة وباستعمال عينات اسطوانية الشكل، وتشكل نهايتا عينة الاختبار بحيث تكونان قابلتان للتثبيت على آلة الفتل هذه. تثبت إحدى نهايتي العينة بجسم الآلة بينما تحمل النهاية الأخرى بعزم فتل وبنتيجة التحميل فإن كل مولد من مولدات سطح العينة والذي هو بالأساس عبارة عن مستقيم سوف يدور حول محور الاسطوانة ليشكل خطاً لولبياً ويصبح مائلاً على وضعه الأصلي بزاوية مقدارها  $\gamma$  (الشكل 6-10). يسجل أثناء الاختبار العزم المطبق تدريجياً وكذلك زاوية الفتل  $\theta$  المقابلة لكل عزم ويرسم منحنى  $(M_t - \theta)$ .



الشكل 10-6

اختبار الفتل

يحدث عزم الفتل ( $M_t = P.d$ ) المطبق على الطرف الحر من العينة زاوية الفتل  $\theta$  وهي الزاوية بين وضع المستقيم قبل الفتل ووضعه بعد الفتل (الشكل 10-6). يمكن بناءً على ذلك إفادة الانفعال في نقاط مختلفة  $r$  من المقطع الواحد وعلى طول محور العينة  $L_0$  وعند إحداث زاوية الفتل  $\theta$  بعزم الفتل  $M_t$  يؤخذ الانفعال في السطح الخارجي للعينة:

$$\gamma_R = \frac{R}{L_0} \theta$$

وعند محور العينة تكون  $\theta = 0$  وبالتالي فإن الإجهاد يكون معدوماً بينما يكون أعظمياً عند سطح العينة وتزايد الإجهاد في المقطع بين المحور والسطح هو

تزايد خطي ضمن مجال حد مرونة العينة وقيمة الإجهاد ضمن هذا المجال تساوي:

$$\tau = \gamma \cdot G$$

حيث  $G$  عامل مرونة الفتل وقيمة هذا العامل في المعادن  $G = 0.38 E$  . كثيراً ما تكون الغاية من اختبار الفتل هي البحث عن قيمة  $G$  ، لذلك فإن حساب الإجهاد الأعظمي  $\tau$  عند السطح يتم بالاعتماد على قيمة العزم المطبق على العينة وفق المعادلة:

$$\tau = \frac{M_t \cdot R}{I_p}$$

حيث  $R$  - نصف قطر العينة

$I_p$  - عزم العطالة القطبي للمقطع ويكون:

في حالة المقطع الدائري:

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32}$$

في حالة المقطع العرضي الدائري الأجوف (  $D, d$  ):

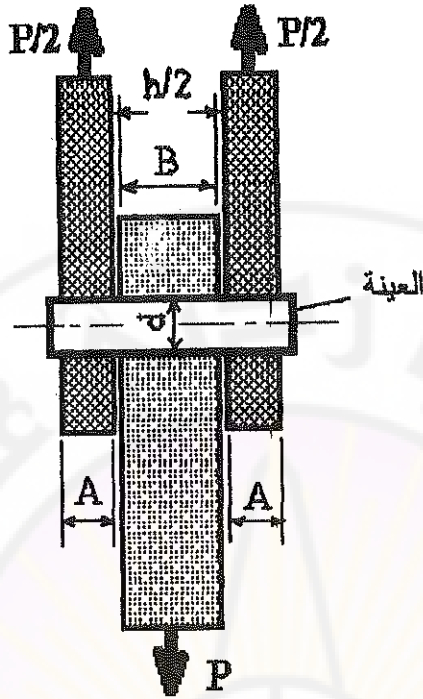
$$I_p = \frac{\pi}{32} (D^4 - d^4)$$

يجرى اختبار الفتل عادةً على المواد الهشة حتى الانكسار أو التخطم أما المواد اللدنة فيكتفي باختبارها حتى حد الانسياب وذلك لأنه بعد هذا الحد يصبح توزيع الإجهاد في المقطع أكثر تعقيداً.

## 6 - 5 اختبار القص Shear Test:

يجرى اختبار القص عادةً على عينات من قطع الآلات المعرضة لإجهادات قص وفي ظروف مشابهة لظروف الاختبار مثل المسامير والبراغي والتباشيم وغيرها وذلك لتحديد مدى تحمل أو مقاومة القص لدى هذه العينات. يتم تنفيذ اختبار القص عادةً بالقص المزدوج على آلة الشد العامة حيث يثبت الرأس الحامل للقطعتين المتوازيتين على الرأس الثابت لآلة الشد، أما اللسان المنزلق فتثبت نهايته على الرأس المتحرك للآلة ( الشكل 6-11 ). توضع العينة في الثقب الذي يمتد عبر قطع رأس القص الثلاث والذي يتناسب قطره مع قطر العينة. وبالتأثير على اللسان المنزلق بقوة شد أو ضغط تقص العينة عند مقطعين مختلفين أي عند السطحين الفاصلين بين اللسان المنزلق والقطعتين الجانبيتين. تقاس خلال الاختبار القوة العظمى فقط وتحسب مقاومة القص بتقسيم أكبر قيمة للقوة يصل إليها التحميل على ضعف مساحة مقطع العينة:

$$\tau = \frac{P_{\max}}{\frac{2 \pi d^2}{4}}$$



الشكل 6-11  
اختبار القص

#### 6 - 6 اختبار القساوة ( الصلادة ) Hardness Test:

تعرف القساوة بمقاومة المادة للخدش أو الاختراق بمادة أخرى، وتعتمد هذه الخاصية على الخواص الأخرى للمادة مثل معامل المرونة ومقاومة الشد والخضوع والمطيلية. ولهذا فإن تقدير رقم القساوة لمادة ما يمكن أن يعطي مؤشراً للخواص الميكانيكية الأخرى. يعد اختبار القساوة من أهم الاختبارات الستاتيكية للمواد، نظراً لسهولة إجراء هذا الاختبار من جهة ولعدم الحاجة لصنع

عينات اختبار خاصة من جهة أخرى. حيث يتم الاختبار على نفس القطعة المستخدمة في الآلة أو المنشأة لكون هذا الاختبار لا يسبب أي تحطم أو تشوه يمكن أن يؤثر على خواص القطعة المختبرة وصلاحياتها.

تشارك طرق اختبار القساوة بالمبدأ العام حيث يتم وضع الجسم القاسي فوق السطح المستوي للعينة ثم يحمل بقوة معينة وبعد إزالة التحميل يقاس قطر أو أبعاد انغماس الجسم في العينة. تعطي نسبة القوة المطبقة إلى سطح الانغماس مقدار القساوة رقمياً. تختلف طرق قياس القساوة عن بعضها البعض بنوع وشكل الجسم القاسي المستخدم ومقدار القوة المطبقة على هذا الجسم. وتوجد العديد من الطرق لقياس القساوة أهمها وأوسعها انتشاراً هي طريقة برينل وطريقة روكويل وطريقة فيكرز.

#### 6 - 6 - 1 اختبار القساوة بطريقة برينل Brinell Hardness Test:

تقوم هذه الطريقة على ضغط كرة من الفولاذ المقسى ذات قطر محدد D في سطح العينة المستوي باستخدام ثقل ثابت P. ويلاحظ بعد التحميل تكون أثر دائري (تقعر على شكل قطاع دائري) على سطح العينة قطره d (الشكل 12-6). والرقم الذي يميز قساوة المادة هو النسبة بين القوة المطبقة ومساحة سطح هذا التقعر مقدراً في وحدات  $\text{kg/mm}^2$  أي:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

ولتسهيل عملية قياس القساوة بهذه الطريقة فقد وضعت جداول خاصة تعطي قيمة القساوة HB بتابعية قطر التقعر d وذلك وفقاً لقطر الكرة المستخدمة والحمولة المطبقة. وترفق عادةً بجهاز القساوة كرات فولاذية مقساة مختلفة الأقطار 1.25, 2.5, 5, 10 mm ويتم اختيار الكرة على أساس إحداث الانفعال اللازم لامكان قياس قطر الأثر وكذلك حسب سمك العينة. ويتم قياس قطر الأثر

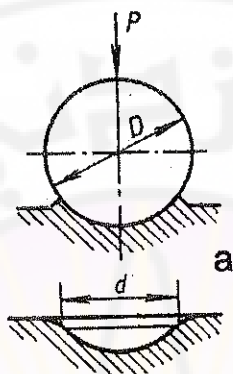
d بواسطة عدسة خاصة عليها تدريج خطوته 0.1 mm كما في الشكل 6-13 .  
 أما تطبيق الحمل P فيتم استاتيكيًا ويترك هذا الحمل مؤثراً لفترة زمنية كافية  
 لتشكل التقرع ويحدد زمن إبقاء الحمولة على الكرة بعشرة ثوان للمواد القاسية  
 وبثلاثين ثانية للمواد اللينة ( الطرية ) وتختار الحمولة حسب المادة المراد قياس  
 قساوتها ، فمثلاً لل فولاذ والحديد الصب  $P = 3000 \text{ kg}$  أي  $P = 30 \times D^2$   
 وللنحاس وسبائكه  $P = 1000 \text{ kg}$  أي  $P = 10 \times D^2$  وللمعادن الطرية مثل  
 الألمنيوم  $P = 250 \text{ kg}$  أي  $P = 10 \times D^2$  .

لإجراء اختبار القساوة وإعطاء نتيجة القياس بشكل دقيق يجب الانتباه  
 إلى النقاط التالية:

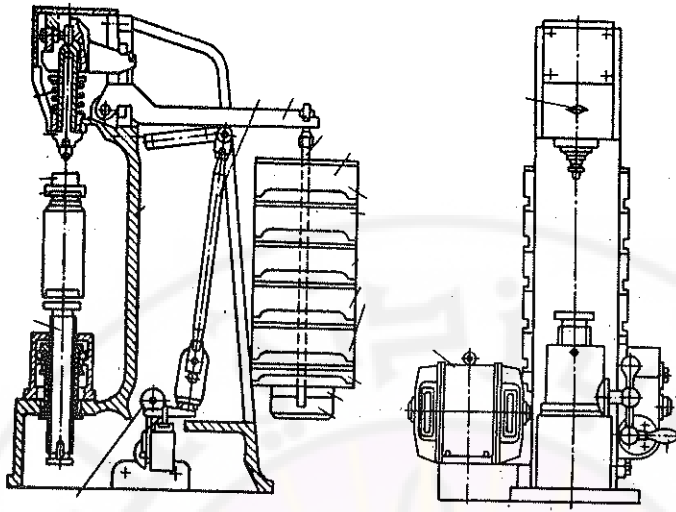
1. جعل سطوح العينة مستوية ومتوازية ليتم تطبيق الحمولة بشكل  
 عامودي على السطح.
2. صقل العينة وتنظيف كلاً من السطح المختبر والسطح المقابل  
 له.
3. يجب أن يكون سمك العينة لا يقل عن عشرة أضعاف عمق  
 الأثر الحاصل نتيجة الاختبار.
4. تطبيق الحمولة بعيداً عن حافة العينة وعن أي أثر آخر بمقدار  
 لا يقل عن ضعف قطر الكرة المستخدمة.
5. يجب أن يكون التحميل بشكل بطيء.
6. إن قياس قساوة السطح المقسى إلى عمق بسيط بهذه الطريقة  
 غير عملي لأن عمق الأثر قد يزيد عن سمك النقسية.
7. يفضل إجراء ثلاث اختبارات على الأقل في نقاط متفرقة وأخذ  
 الوسط الحسابي لهذه النتائج.
8. لا يصلح اختبار برينل لقياس قساوات الصفائح الرقيقة.



9. لا يوصى باستخدام طريقة برينل للمعادن التي تزيد قساوتها عن HB450 إذ أن ذلك قد يؤدي إلى تفلطح الكرة مما يؤثر على دقة القياسات.



الشكل 6-12 - a  
طريقة برينل لقياس القساوة

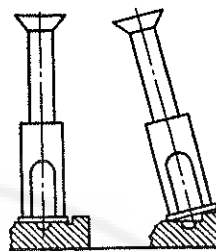
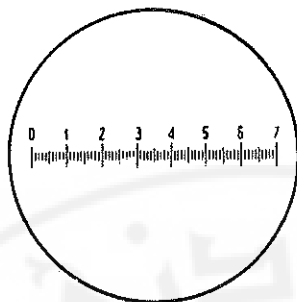


الشكل 6-12-ب

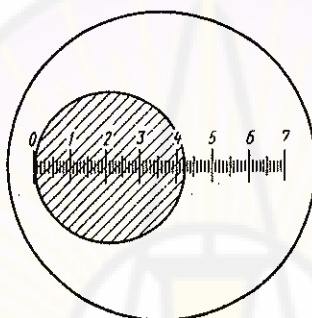
جهاز برنيل لقياس القساوة



عدسة قياس الأثر



طريقة القياس  
خطأ صح



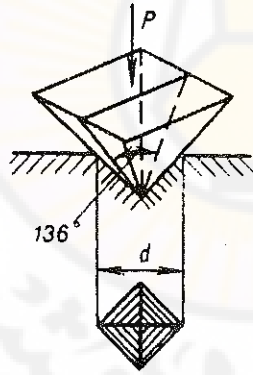
نتيجة القياس

الشكل 6-13

طريقة قياس قطر التفرع

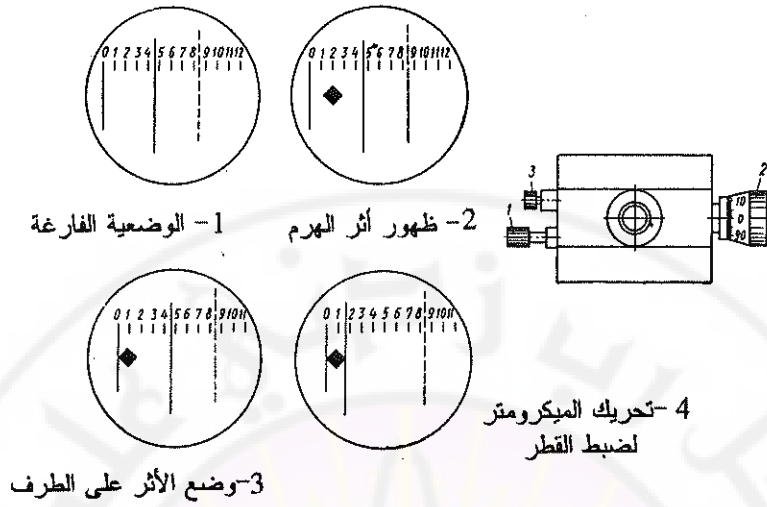
## 6 - 6 - 2 اختبار القساوة بطريقة فيكرز Vickers Hardness Test:

تستخدم هذه الطريقة أساساً لقياس قساوة الأجزاء والمشغولات المعدنية الرقيقة ذات القساوة العالية. وتتفق هذه الطريقة من حيث المبدأ مع طريقة برينل مع فارق واحد وهو استبدال الكرة الفولاذية بهرم رباعي من الألماس الذي هو أكثر المواد قساوة زاوية رأسه 136 درجة. ويتم تعيين القساوة عن طريق قياس مساحة الأثر الذي يتركه الهرم الرباعي على السطح المصقول ( الشكل 6-14 ). ويجرى الاختبار كما يلي: توضع العينة بعد تحضيرها وصقلها على المسند الثابت لتلامس رأس الهرم ثم تطبق الحمولة تدريجياً بواسطة ذراع حتى الحمولة المناسبة وتترك لفترة لا تقل عن عشرة ثوان ثم ترفع الحمولة وينظر إلى الشاشة الموجودة في الجهاز ( الشكل 6-15 ) لتظهر الأثر وسيكون الأثر بشكل مربع في الحالة النظامية وبشكل معين في الحالة العادية. وينزلق المستقيمين الموجودين في الشاشة والمرتبطين بالمسطرة المدرجة ليتم قياس قطري المعين ثم يؤخذ المتوسط الحسابي لهذين القطرين.



الشكل 6-14

اختبار القساوة بطريقة فيكرز



الشكل 15-6

طريقة قياس أثر الهرم الألماسي

ت حسب المساواة من المعادلة:

$$HV = \frac{2P \sin(\alpha/2)}{d^2} = 1.8544 \frac{P}{d^2}$$

حيث:

d- المتوسط الحسابي لطول قطري الأثر بالملم؛

$\alpha$ - الزاوية بين الوجهين المتقابلين وتساوي 136 درجة؛

P- الحمل المؤثر على الهرم الألماسي ويختار من الأحمال التالية:

5, 10, 20, 30, 50, 100, 120 kg ويرمز للمساواة على الترتيب

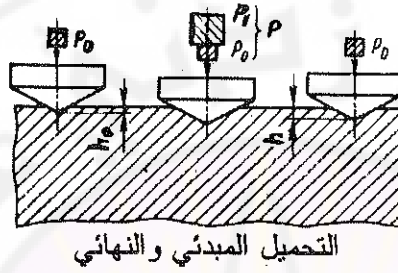
HV5, HV10, HV20, HV30, HV50, HV100, HV120... الخ .  
ويتم اختيار الحمل على أساس أنه كلما قل سمك العينة كلما لزم استخدام حمل  
أقل. ويمكن الحصول على رقم القساوة مباشرة من الجداول وفقاً للحمولة  
المطبقة والمتوسط الحسابي لطول قطري الأثر.

### 6 - 3 اختبار القساوة بطريقة روكويل Rockwell Hardness Test:

إن ما يؤخذ على كل من طريقتي برينل وفيكرز هو البطء في الحصول  
على النتائج الرقمية، حيث لا بد بعد إجراء الاختبار من إجراء القياسات لأبعاد  
الانطباع ثم حساب القساوة أو الرجوع إلى الجداول للحصول على قيمة هذه  
القساوة. أما طريقة روكويل فقد تخلصت من هذا العيب وذلك باعتمادها مبدأ  
قياس عمق الأثر الذي يحدثه مخروط ألماسي زاوية رأسه 120 درجة أو كرة  
من الفولاذ المقسى قطرها 1/16 انش. ويتناسب عمق هذا الأثر عكساً مع  
القساوة، لذلك فقد زودت أجهزة قياس القساوة بطريقة روكويل بعدادات خاصة  
تُعطي أرقاماً تتناسب عكساً مع عمق الانغماس. وطردها مع قساوة العينة ( الشكل  
16-6 ).

يجري ضغط المخروط أو الكرة باستخدام حملين متتاليين الواحد بعد  
الأخر. ففي حال استخدام الكرة الفولاذية يكون الحمل الابتدائي  $P_0 = 10 \text{ kg}$   
والحمل الرئيسي  $P_1 = 90 \text{ kg}$  وعندها يتم قراءة القساوة على التدرية B على  
مؤشر الجهاز والتي تكون باللون الأحمر وتعطى القساوة بـ HRB ( الشكل 6  
17- ). أما عند استخدام المخروط الألماسي يكون الحمل الابتدائي  $P_0 = 10 \text{ kg}$   
والحمل الرئيسي  $P_1 = 140 \text{ kg}$  وعندها يتم قراءة القساوة على التدرية C  
على مؤشر الجهاز والتي تكون باللون الأسود وتعطى القساوة بـ HRC .  
ويمكن استخدام هذه الطريقة لقياس قساوة الشرائح الرقيقة والعالية القساوة وذلك  
باستخدام المخروط الألماسي وحمل رئيسي  $P_1 = 50 \text{ kg}$  وتؤخذ القراءة على

التدریجة السوداء ویرمز للقساوة بـ HRA . یبین الجدول 6-3 الحمولات  
والرؤوس المستخدمة فی طريقة روکویل لقیاس القساوة.



الشکل 6-16  
اختبار القساوة بطريقة روکویل

الجدول 3-6 : الحمولات والرؤوس المستخدمة في طريقة روكويل

| الرمز   | الرأس المستخدم | الحمولة الابتدائية<br>kg | الحمولة الكلية<br>kg | المواد المقاسة                      |
|---------|----------------|--------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| HRA     | هرم 120°       | 10                       | 60                   | الفولاذ المكين > 0.7MM              |
| HRB     | كرة 1/16"      | 10                       | 100                  | الفولاذ الطري والمعادن غير الحديدية |
| HRC     | هرم 120°       | 10                       | 150                  | الفولاذ المقسى > 1.2MM              |
| HRD     | هرم 120°       | 10                       | 100                  | الفولاذ المقسى > 1MM                |
| HRE     | كرة 1/8"       | 10                       | 100                  | الفولاذ الطري والمعادن غير الحديدية |
| HRF     | كرة 1/16"      | 10                       | 60                   | الفولاذ الطري والمعادن غير الحديدية |
| HRG     | كرة 1/16"      | 10                       | 150                  | الفولاذ الطري والمعادن غير الحديدية |
| HRL     | كرة 1/4"       | 10                       | 60                   | البلاستيك                           |
| HRM     | كرة 1/4"       | 10                       | 100                  | البلاستيك                           |
| HRN(15) | هرم 120°       | 3                        | 15                   | الفولاذ المقسى > 0.2MM              |
| HRN(30) | هرم 120°       | 3                        | 30                   | الفولاذ المقسى > 0.35MM             |
| HRN(45) | هرم 120°       | 3                        | 45                   | الفولاذ المقسى > 0.5MM              |
| HRT(15) | كرة 1/16"      | 3                        | 15                   | جميع المعادن الطرية > 0.2MM         |
| HRT(30) | كرة 1/16"      | 3                        | 30                   | جميع المعادن الطرية > 0.35MM        |
| HRT(45) | كرة 1/16"      | 3                        | 45                   | جميع المعادن الطرية > 0.5MM         |

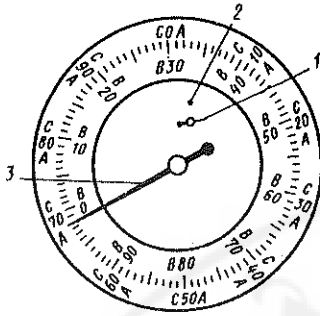


تتميز طريقة روكويل لاختبار القساوة بما يلي:

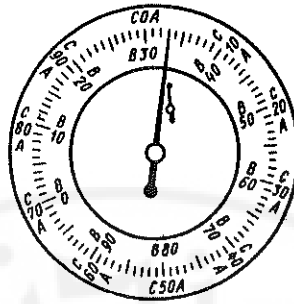
1. القساوة مقسمة على التدرج بين الصفر و 100 ؛
2. يمكن قياس مدى واسع من القساوة بتغيير الأوزان ونوع التدرج والرؤوس المستخدمة.
3. تقل فرصة الخطأ حيث تكون القراءة مباشرة من مؤشر الجهاز ولا يحتاج الأمر إلى حسابات أو جداول.
4. إن استخدام الحمل المبدئي يسمح باتصال جيد ما بين السطح والرأس وبهذا يلغى أي خطأ نتيجة عدم الاتصال الجيد مع السطح.
5. الإنتاجية العالية وصغر الأثر الذي يتركه الرأس على العينة.

#### 6 - 4 اختبار القساوة المجهرية Microhardness Test:

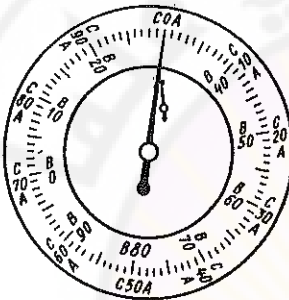
تتضح أهمية وضرورة تعيين القساوة المجهرية في حالة الأجزاء المعدنية الصغيرة الأبعاد وفي حالة دراسة خواص بعض الوحدات المحددة في السبائك. ويتكون جهاز تحديد القساوة المجهرية من جهاز لضغط الهرم الألماسي تحت تأثير أحمال صغيرة بالإضافة إلى مجهر ضوئي لدراسة المعادن. ويضغط الهرم الألماسي في السطح الجاري اختباره تحت تأثير حمل يتراوح قدره بين 500 g - 15 . ويتم تعيين القساوة المجهرية باستخدام معادلة مماثلة لتعيين القساوة بطريقة فيكرز:  $H = 1.8544 P/d^2$  حيث  $P$  الحمل المؤثر و  $d$  القطر المتوسط للأثر الذي يتركه الهرم ويقاس وفق الطريقة المبينة في الشكل 6-18. ويجب إعداد العينات لقياس القساوة المجهرية بطريقة مماثلة لإعداد العينات للفحص المجهرية. يرمز للقساوة المجهرية بالرمز  $H$  ويضاف إلى الرمز أحياناً مقدار الحمل المستخدم.



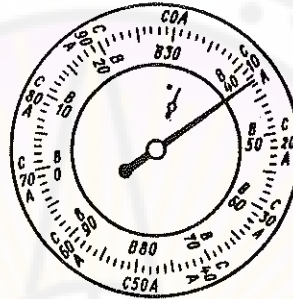
أ- الوضع الأول



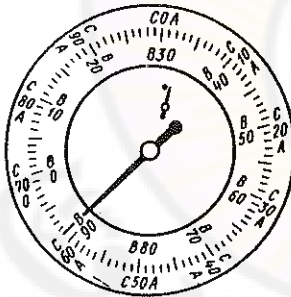
ب- تطبيق  $P_0$



ج- تطبيق مؤشر الضياء



د- تطبيق  $P_1$  وقراءة المساواة



هـ- إزالة الحمل

الشكل 6-17

تدرجات مؤشر القراءة في جهاز روكويل

من أهم خواص هذا الاختبار ما يلي:

1. يعد من الاختبارات التي تستخدم لأغراض البحث ولا يستخدم كثيراً لأغراض صناعية.

2. يعطي نتائج ذات دقة متناهية ولذا فهو يستخدم للمواد ذات الحساسية العالية مثل الأفلام والرقائق وكذلك قياس قساوة الحبيبات أو المكونات المختلفة للسبائك.

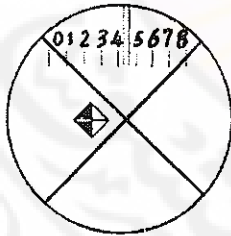
3. يمكن استخدام هذه الطريقة في قياس قساوة المعادن والبلاستيك والمواد السيراميكية.



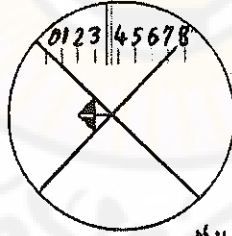
قياس قساوة حبيبة



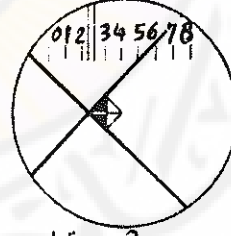
علاقة أبعاد الأثر بالحمل المطبق



1



2



3

قياس بعد الأثر

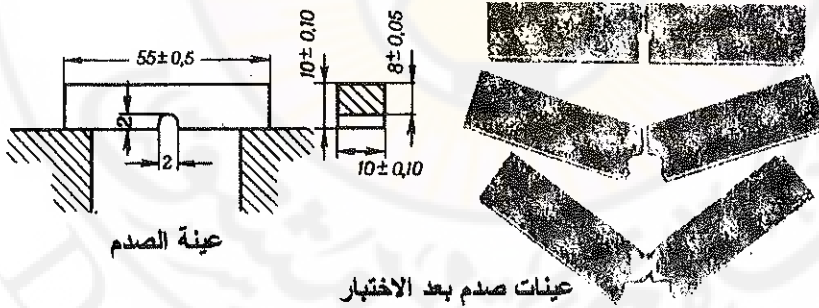
الشكل 6 - 18

قياس القساوة المجهرية

## 6 - 7 اختبار الصدم Impact Test:

وضعت طرق متعددة لاختبار المواد تحت حمولات الصدم وتختلف هذه الطرق باختلاف الهدف، فهناك طرق اختبار الصدم الخاصة التي تجريها بعض الشركات الصناعية في أجهزة خاصة بها تؤمن تطبيق شروط الاستخدام العملية على وحدة المنتج كاختبارات الصدم التي تجريها على المحاور والمسننات وعجلات السيارات والقاطرات.

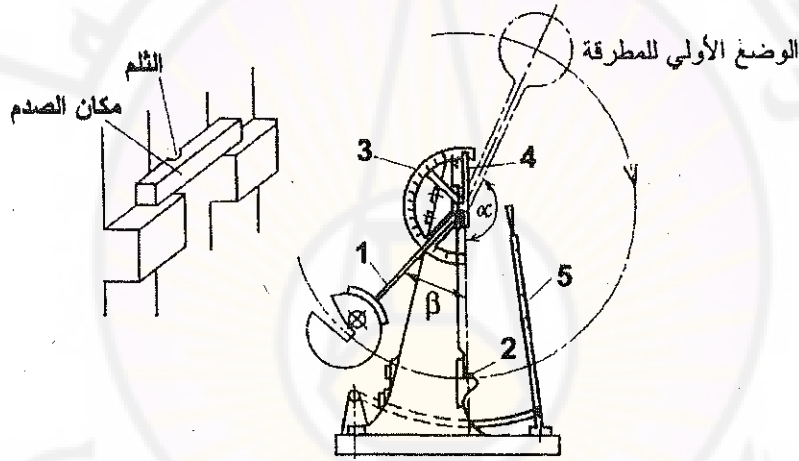
تعرف مقاومة الصدم بالطاقة المطلوبة لكسر حجم معين من المادة، وكلما زادت الطاقة الممتصة زادت مقاومة المادة للصدمات. إن أهم أنواع اختبارات الصدم هو اختبار تشاربي Charpy ويعين بهذا الاختبار العمل اللازم لكسر عينة قياسية تحتوي على ثلم عرضي. ويفيد هذا الاختبار في مقارنة المواد من حيث مقاومتها وإظهار بعض الخواص كتأثير الشقوق الدقيقة في البنية أو الحزوز في السطح الخارجي. تحضر عينة اختبار الصدم على شكل متوازي مستطيلات مساحة مقطعه  $100 \text{ mm}^2$  وطول  $55 \text{ mm}$  وتحدث في أحد الوجوه حز ( ثلم ) على شكل حرف V يتراوح عمقه بين  $2 - 2.5 \text{ mm}$  ونصف قطر تحدب سطحه الداخلي  $R=0.25 \text{ mm}$  ( الشكل 6 - 19 ).



الشكل 6-19

عينات اختبار الصدم

يتم اختبار الصدم على آلة الصدم ( الشكل 6 - 20 ) التي تتألف من حاملين مثبتين إلى أرضية بشكل شاقولي يتم فصل في أعلاهما الذراع الحامل لمطرقة وزنها  $G$  (  $G = 15$  or  $30$  kg ) تتحرك حول مفصل ذراعها بحركة نواسية وفي أسفل الحاملين تتركز العينة على مسند ذي فكيين البعد بينهما 40 mm وتوضع العينة بحيث يكون حزها في الاتجاه المقابل لصدمة المطرقة. تعطى طاقة الصدم برفع المطرقة إلى ارتفاع أولي  $h_1$  وتترك المطرقة بفعل ثقلها لتصدم العينة فتحني العينة وتكسرها وتستمر بالنوسان إلى الجهة الأخرى إلى ارتفاع قدره  $h_2$  أقل من الارتفاع الأولي.



الشكل 20-6

آلة اختبار الصدم

1. الذراع الحامل للمطرقة ( النواس ) ، 2. العينة ، 3. قرص التدرج ، 4. المؤشر ، 5. المكبح.

يتم تعيين متانة الصدم  $a$  باعتبارها مقدار العمل  $W$  المبذول لكسر العينة منسوباً إلى مساحة المقطع العرضي للعينة في مكان التلم قبل الاختبار  $F$  أي أن:

$$a = \frac{W}{F} \text{ kgm/cm}^2$$

ويحسب العمل المبذول لكسر العينة من المعادلة:

$$W = G.l.(\cos \beta - \cos \alpha)$$

حيث  $l$  - طول ذراع الآلة  $m$

$G$  - وزن المطرقة  $kg$

$\alpha$  - الزاوية التي يصنعها الذراع مع المستقيم الشاقولي قبل بدأ الصدمة

$\beta$  - الزاوية التي يصنعها الذراع مع المستقيم الشاقولي قبل بدأ الصدمة.

والزاوية  $\alpha$  التي يصنعها الذراع مع المستقيم الشاقولي في وضعه الابتدائي هي زاوية ثابتة، أما الزاوية  $\beta$  التي تحدد وضع الذراع في أقصى ارتفاع له بعد الصدمة يجرى قياسها باستخدام المؤشر الخاص على آلة الصدم. وعادة ما تكون تدريجة القياس عائدة لمقدار العمل المبذول أثناء الصدم مما يغني عن الحساب بالمعادلة المذكورة.

إن قيمة عمل الصدم غير ثابتة وتتعلق بعوامل كثيرة منها: شكل العينة وشكل التلم وقطر تحذب السطح الداخلي للتلم وسرعة الصدم. لهذا فإن هذه القيمة ليست قيمة مطلقة لتمييز صفة ميكانيكية، ومع ذلك فهي ذات قيمة عملية كبيرة ويستفاد منها في المقارنة بين مادة وأخرى لتصنيع قطعة في آلة ما يمكن أن تتعرض أثناء عملها لظروف مشابهة لظروف التجربة، وكذلك اختبار مدى

حساسية المادة وانخفاض قدرتها على تحمل الصدمات عند وجود حز أو شرخ على سطحها.

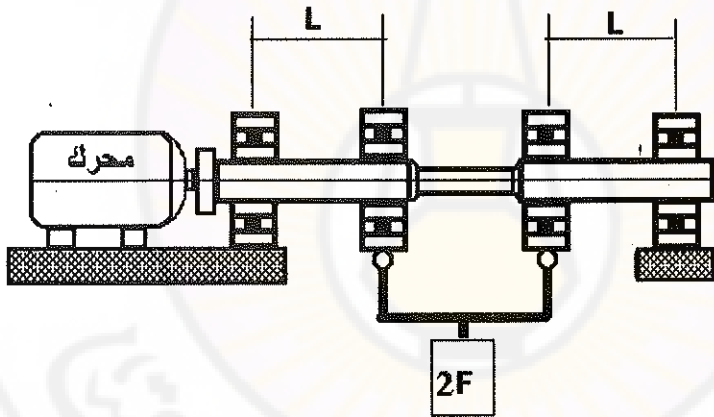
## 6 - 8 اختبار التعب Fatigue Test:

تسمى ظاهرة انكسار المعدن تحت تأثير الإجهادات المتكررة أو متغيرة الاتجاه بالكسر التعبى للمواد. ويمكن أن يحدث الكسر التعبى عند إجهادات تقل كثيراً عن المقاومة القصوى وقد تقل حتى عن مقدار حد الانسياب. وتسمى قدرة المادة على مقاومة الانكسار في هذه الظروف بمقاومة التعب. والسبب في تعب المواد هو الانزلاقات التي تحدث في الحبيبات البلورية الموجودة في أسوأ وضع بالنسبة للقوى المؤثرة. وتساعد هذه الانزلاقات على تكوين شقوق بالغة الدقة وتزداد تدريجياً تحت تأثير التحميل المتكرر أو المتغير الاتجاه حتى تصل إلى مستويات اتصال الحبيبات وبعد ذلك تنتشر على مدى هذه الحدود. ويتكون المكسر التعبى من منطقتين واضحتي: منطقة خارجية ومنطقة داخلية. وتكون المنطقة الخارجية ذات سطح ناعم وهي منطقة الشق المتزايد تدريجياً. أما المنطقة الداخلية وتتميز ببناء حبيبي، فهي منطقة الانكسار المفاجئ. وتحدث ظاهرة التعب عند تخطي إجهاد التعب حد التعب للمادة. ويعرف حد التعب بأنه أكبر إجهاد تتحمله المادة خلال عدد معين (أساسي) من دورات التحميل دون أن تنكسر. وتختبر عينات الفولاذ لتحديد مقاومتها للتعب على مدى عدد أساسي قدره 5000000 دورة، أما المعادن غير الحديدية فتختبر على مدى عدد أساسي من الدورات قدره 20000000 دورة.

تكون الإجهادات المتكررة التي تتعرض لها المادة إما وحيدة النوع أو خليط من الإجهادات. وتختلف آلات الاختبار المستخدمة تبعاً لنوع التحميل حيث تتكون معظم الآلات من جزء خاص بأسلوب التحميل مع تدرجات لقياس القوى

المؤثرة ( الحمولة )، وعدادات للتحكم في سرعة التحميل ونوعه وقراءة النتائج. وتعمل آلات اختبار التعب بطريقتين:

تسمى الطريقة الأولى بطريقة الانحناء الدوراني ويتم في هذه الطريقة تثبيت العينة على الآلة أفقياً من نهايتها على محامل كروية ( الشكل 6-21) وتحملها عند منتصفها في نقطة أو نقطتين متساويتي البعد عن نقطتي التثبيت، بثقل محمول على محامل كروية فيتولد في العينة إجهادات شد في نصفها السفلي وإجهادات ضغط في نصفها العلوي، وتدور العينة بمحرك كهربائي وأثناء الدوران يكون تغير الإجهاد في كل مولد من مولدات سطح العينة الاسطوانية تغيراً جيبياً وتتبادل الإجهادات التأثير على العينة ( شد وضغط ) طيلة مدة الاختبار.



الشكل 6 - 21  
مخطط آلة اختبار التعب

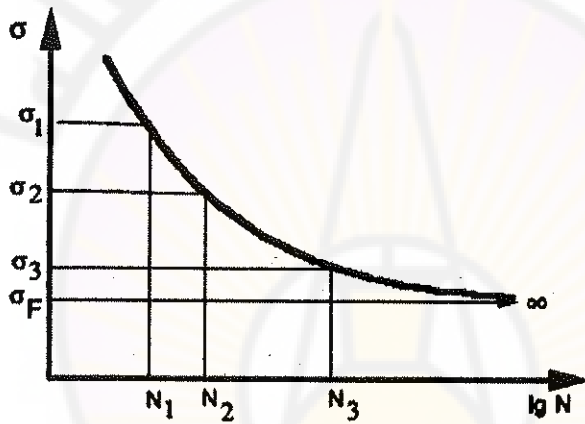


الطريقة الثانية هي طريقة الشد والضغط بالاتجاه الطولي للعينه ويجرى الاختبار على آلات تشبه إلى حد كبير آلات الشد العامة.

إن الغاية الأساسية من اختبارات التعب هي من جهة معرفة حد الصمود للمادة المختبرة ومن جهة أخرى معرفة عمر القطعة المصنوعة من هذه المادة فيما لو حملت بإجهاد ما أكبر من حد الصمود، وكل هذه القيم يتم الحصول عليها بسهولة بإنشاء ما يسمى بمنحني فولر ( Wohler ) للمادة. ويتم إنشاء هذا المنحني باستخدام عدداً من العينات يتراوح بين 6 و 10 عينات الاسطوانية الشكل، وتحمل كل منها بأحمال متكررة ومختلفة بحيث يكون الإجهاد المتكرر على العينة الأولى:  $\sigma_1 = 0.7 \sigma_y$  فتتكسر هذه العينة بعد عدد من مرات تكرار التحميل يساوي  $N_1$  ، ثم تحمل العينة الثانية بإجهاد أقل لتتكسر بعد عدد من المرات  $N_2$  ، ويستمر إنقاص الإجهاد مع العينات التالية حتى آخر عينة من المجموعة. تختار خطوات إنقاص الإجهاد على العينات المتتالية بحيث تبقى العينة الأخيرة على الأقل سليمة دون أي كسر. ثم يرسم مخطط بياني يؤخذ على محوره الشاقولي الإجهاد وعلى محوره الأفقي تردد الحمل أو عدد مرات التحميل التبي تؤخذ بخطوات لوغاريتمية نظراً لكبر الأرقام التي قد نحصل عليها. تسجل على المخطط النقاط التي يتم عندها انكسار كل من العينات المختبرة وبالوصل بين تلك النقاط نحصل على منحني فولر ( الشكل 6 - 22 ).

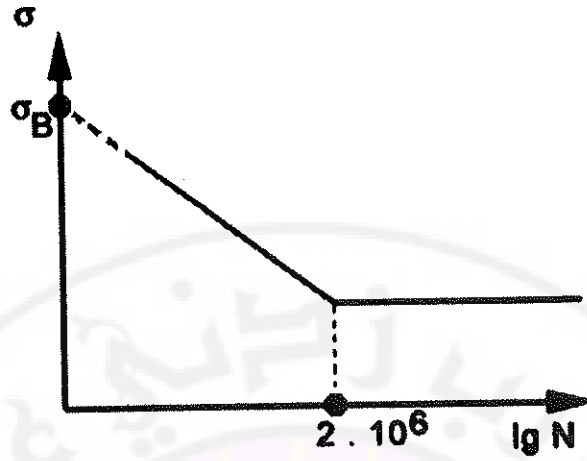
ويلاحظ أن هذا المنحني يكون شديد الانحدار في بدايته ثم يقل انحداره حتى يتناهي إلى خط أفقي، والخط الأفقي هذا هو حد الصمود للمادة. كما يمكن معرفة قيمة الإجهاد عند تصميم قطعة ما لتعيش عمر محدد  $N$  من مرات تكرار الحمل، عندئذ تؤخذ قيمة  $N$  على المحور الأفقي ويرفع منها شاقول حتى يتقاطع مع المنحني ومن تلك النقطة نرسم خطاً أفقياً فنحصل على قيمة الإجهاد المسموح به. وكثيراً ما يبسط شكل منحني فولر حيث يرسم الجزء الأول منه

على شكل مستقيم مائل يحدد ميله بمعرفة نقطتين منه والجزء الثاني على شكل مستقيم أفقي بحيث تكون نقطة تقاطعهما واقعة عند  $N = 2 \cdot 10^6$  ليكون الخط المائل ممثلاً لمنحني العمر ، والخط الأفقي لحد التعب أو حد الصمود للمادة ( الشكل 6 - 23 ) ويرسم الخط المائل في كثير من الأحيان بحيث يصل بين بداية المستقيم الأفقي عند النقطة  $N = 2 \cdot 10^6$  وبين النقطة  $\sigma_B$  على الخط الشاقولي.



الشكل 6 - 22

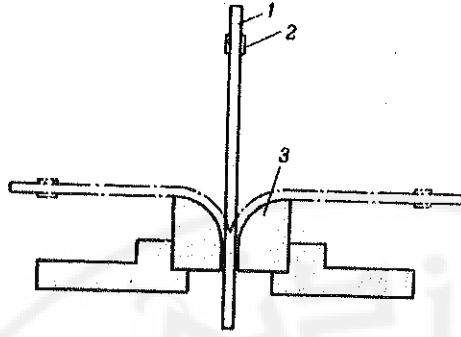
منحني فولر



الشكل 6 - 23  
الشكل المبسط لمنحني فولر

#### 6 - 9 اختبار الثني :

يجرى اختبار الثني للألواح والقضبان الرقيقة المشكّلة على البارد. حيث تمسك العينة على الملزمة ( الشكل 6 - 24 ) ثم تنثني إلى اليمين وإلى اليسار عدة مرات حتى تتكسر. ويحدد عدد مرات انثناء العينة مدى صلاحية المادة للأعمال المختلفة.



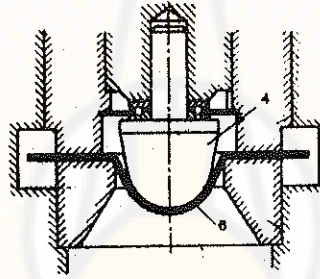
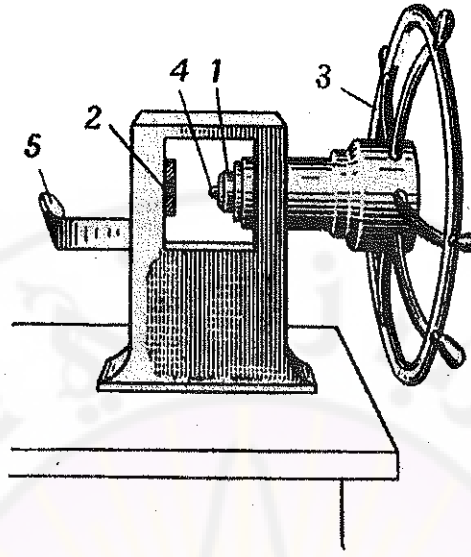
الشكل 6 - 24

اختبار الشد

1. العينة، 2. الماسك، 3. فكي الملزمة

#### 6 - 10 اختبار السحب:

يجرى هذا الاختبار لتحديد قدرة الألواح على تحمل التشكيل بالكبس والسحب على البارد. ويتم الاختبار بضغط عينة من المادة المختبرة مجهزة على شكل قرص بين طرفي العמוד ( الشكل 6 - 25 ) والإسطنبة. وعند تدوير الدولاب تدريجياً وببطء تُضغَط المادة المختبرة بواسطة الطرف الكروي للضاغط . يستمر الانضغاط حتى اللحظة التي يظهر فيها أول شرخ على السطح. ويلاحظ ظهور الشرخ بالنظر في المرآة. ويحدد عمق الفجوة المتكونة حتى لحظة ظهور الشرخ قدرة المادة على تحمل التشكيل بالسحب.



الشكل 6 - 25

اختبار السحب

1. عامود الضغط، 2. الإسطوانة، 3. دولاب الضغط، 4. الرأس الضاغط،
5. المرآة، 6. العينة

## 6 - 11 اختبار الزحف Creep Test:

إن العديد من الآلات تقتضي ظروف استعمالها أن تعمل في درجات حرارة مرتفعة وبشكل مستمر. وفي ظروف كهذه تبين أن الكسر الحاصل في بعض هذه القطع لا تنطبق عليه العلاقات والقوانين المتعلقة بالخواص الميكانيكية في الظروف الطبيعية العادية. يسبب الإجهاد الثابت في درجات الحرارة المرتفعة انفعالاً مستمراً في المادة وتبعاً لقيمة الإجهاد ودرجة الحرارة قد تنكسر المادة بعد فترة من الزمن. وتسمى ظاهرة الانفعال المستمر تحت تأثير الإجهاد الثابت بالزحف.

يتعلق الزحف بثلاثة عوامل هي: الإجهاد ودرجة الحرارة وعامل الزمن الذي كان في الخواص الميكانيكية الأخرى عديم التأثير. لذلك فإن أي تغيير في أحد هذه العوامل الثلاث سوف يؤدي إلى تغيير في نتائج الزحف. تستعمل في تحديد خواص الزحف الوحدات القياسية التالية: الانفعال ومقاومة الزحف وهي الإجهاد الذي يؤدي إلى كسر العينة بعد فترة محددة من الزمن، حد الزحف وهو الإجهاد الذي يسبب انفعالاً قدره 1% بعد فترة زمنية محددة.

يتم اختبار الزحف على أجهزة خاصة وبشكل مشابه لاختبار الشد، غير أن التحميل يتم ميكانيكياً بتحميل إحدى نهايتي العينة بأثقال محددة لتولد فيها إجهادات شد ثابتة، وذلك بعد تحميل العينة على الجهاز وداخل فرن ترتفع درجة حرارته إلى الدرجة المطلوبة قبل البدء بالتحميل. ويقاس في هذا الاختبار الانفعال بتابعية الزمن. ويبين الشكل 6 - 26 شكلاً تخطيطياً نموذجياً للمنحني الذي نحصل عليه بالرسم البياني للانفعال بتابعية الزمن ويلاحظ على هذا المنحني أن الانفعال يكون سريعاً عند بداية التحميل، ثم تبدأ سرعته بالتناقص حتى النقطة A حيث تثبت وتبقى ثابتة حتى النقطة B التي تبدأ عندها سرعة الانفعال بالتزايد الذي يستمر حتى تنكسر العينة.

يتكون من منحنى زحف المعادن من ثلاثة مراحل للانفعال:  
 أ- المرحلة الأولى: يكون الزحف سريعاً نتيجة لتحريك الانخلاعات في مستويات الانزلاق وتولد انخلاعات جديدة، غير أن هذه السرعة لا تلبث أن تبدأ بالتناقص، وتتميز علاقة الانفعال في هذه المرحلة بالعلاقة التالية:

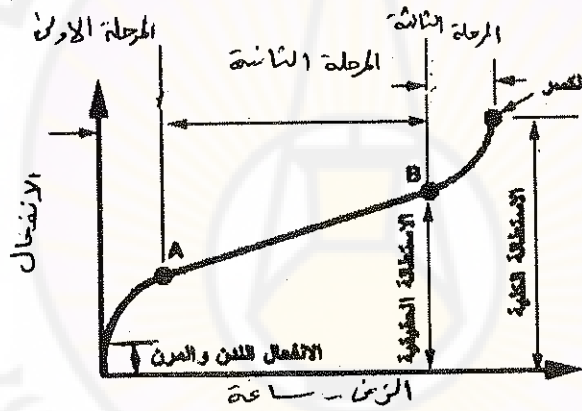
$$\varepsilon = \alpha \cdot \log t$$

حيث  $\alpha$  ثابت يتعلق بنوع المادة.

ب- المرحلة الثانية: أو مرحلة الزحف الثابت وتصبح العلاقة بين الانفعال والزمن علاقة خطية من الشكل:

$$\varepsilon = k \cdot t$$

حيث  $k$  ثابت (سرعة الانفعال) يتعلق بمقداره بنوع المعدن ودرجة الحرارة.



الشكل 6-25

منحنى الزحف

ب- المرحلة الثالثة: تبدأ هذه المرحلة عند بدء ظهور الشقوق أو الشروخ الصغيرة بين البلورات الذي يؤدي إلى تناقص في المقطع وازدياد في الإجهاد وبالتالي تسارع الانفعال حتى الكسر.

تعد خاصية الزحف مهمة جداً في اختبار المواد ذات نقطة الانصهار المنخفضة وكذلك المواد البلاستيكية وفي الأنابيب المغلفة بمادة الأوكسي حيث تشكل تلك المادة نقطة الضعف في اتصال الأنابيب معاً. كما يجب إجراء اختبار الزحف على المعادن والسيائك والمواد السيراميكية التي تستخدم عند درجات الحرارة العالية للتأكد من خواصها تحت هذه الظروف.



## الفصل السابع

### تآكل المواد

7. 1 التآكل
7. 2 قياس التآكل
7. 3 العملية الكهروكيميائية في التآكل
7. 4 التآكل الجوي
7. 5 التآكل في المياه
7. 6 التآكل في التربة



# تآكل المواد

## Corrosion of materials

### 1-7 التآكل (Corrosion) :

هو ذلك الفشل الذي يصيب سطح الأجزاء المعدنية بتأثير الوسط الذي يعمل فيه هذا الجزء المعدني. وفعل التأثير، المؤدي إلى حصول التآكل هو فعل كيميائي أو فعل كيميائي يساعد فعل ميكانيكي .

ظاهرة التآكل ، أصبحت معروفة ومألوفة خصوصاً تلك التي تتعرض إلى أوساط مساعدة على التآكل مثل الجو الرطب وجو المناطق الصناعية من أبخرة معامل ومنتجات عمليات الإنتاج وهناك أمثلة عديدة منها صدأ السيارة، علب المواد الغذائية والصفائح والمقاطع الفولاذية وهياكل مبردات الهواء المائية وكلنا نعرف أن معظم هذه الأجزاء المعدنية. لا تستعمل إلا عندما تكون مطلوبة بطبقة واحدة أو عدة طبقات من أنواع الطلاء المعدني والأصباغ العضوية وكذلك طلاء الصفيحة التي تصنع منها علب المواد الغذائية بالقصدير وطلاء هيكل مبردة الهواء المائية بطرائق الطلاء المتعارف عليها.

وهناك أمثلة عديدة على تآكل الأجزاء المعدنية ولكنها تكاد تكون مألوفة لدى قسم منا فقط وهم أولئك العاملين في الحقول الصناعية المختلفة، مثل تآكل الأنابيب المدفونة في التربة كأنايبب المياه المنزلية وأنايبب نقل الزيت والغاز والتي قد يصيبها التآكل إما من الداخل حيث تتعرض إلى الوسط الذي تنقله مثل الماء أو الزيت أو الغاز، أو من الخارج حيث تكون معرضة للتربة. وهناك أمثلة أخرى على تآكل أجزاء معدنية عديدة عندما تتعرض إلى أوساط صناعية مثل الحوامض والمياه المالحة وما إلى غير ذلك، وفي هذه الحالة يتخذ

التآكل أشكالاً متعددة منها ما يكون موضعياً (Localized) ومنها ما يكون عاماً (General). وبالتالي يمكننا تعريف التآكل بأنه "انحلال المادة أو تلف خواصها بسبب تفاعل سطحها مع الوسط". وبناء على هذا التعريف نرى أن بعض أنواع التآكل تؤدي إلى تحلل المادة وحصول فقدان في وزنها، في حين أن أنواعاً أخرى لا تؤدي إلى فقدان في الوزن بل يكون تلف الخواص مهماً في هذه الحالة. وهناك أنواع أخرى من التآكل تؤدي إلى فقدان في الوزن وتلف في الخواص في الوقت ذاته.

### ٢-٧ قياس التآكل (Measuring of Corrosion) :

يمكن أن يقاس التآكل بحجم وكمية الآثار (التلف) التي يؤدي إليها. فالتآكل يمكن أن يؤدي إلى فقدان في الوزن، أو زيادة في هذا الوزن أحياناً أخرى. والتغير في الوزن هو أحد أهم الآثار الرئيسية التي يتركها هذا الفشل. كذلك يمكن أن يحصل تغير في الخواص الميكانيكية للقطعة المعدنية بسبب تآكلها وكمية التلف هذه، تحسب عادة خلال وحدة زمنية معينة فإنها تعرف "بمعدل التآكل" الذي هو قياس لا يعتمد على الزمن والذي يعبر عنه بوحدات معروفة سنائياً على نكرها، هي وحدات قياس التآكل مقسومة على وحدات الزمن. كما يمكن أن يؤدي إلى تغير في أبعاد القطعة عن طريق فقدان هذه الأبعاد. فيما يلي شرح مختصر لكيفية قياس الآثار التي يتركها في وحدة زمن:

1- تغير الوزن The change of weight : إن تغير الوزن المتسبب عن التآكل خلال فترة زمنية معينة، لقطعة ما في وسط ماء لا يكون ثابتاً، وإنما يعتمد على المساحة السطحية لتلك القطعة المعدنية، إذ يكون أكبر كلما كانت المساحة السطحية أكبر. لذا فإن معدل التآكل في هذه الحالة، يعبر عنه بكمية التغير في الوزن في وحدة زمن من وحدة مساحة والوحدات الشائعة الاستخدام

لهذا الغرض هي المليغرام / يوم / ديسيمتر مربع  $\text{mg/day/d.m}^2$  ويرمز لها باختصار [mdd] .

2- التغير في الأبعاد The change of dimensions : إن كمية الفقدان في سماكة القطعة المعدنية في وحدة زمن المتسببة من التآكل، تستخدم للتعبير عن معدل التآكل بكمية الفقدان في الوزن في وحدة زمن من وحدة مساحة، وذلك عندما يكون التآكل من النوع العام General Corrosion الذي يشمل كافة أجزاء سطح القطعة المعدنية المعينة لأن هذا التعبير يدل مباشرة على عمق المسافة التي يصل إليها التآكل خلال تلك الوحدة الزمنية، وهذا يمكن أن يشير وبشكل واضح إلى عمر القطعة المعدنية عند الاستخدام. إن الوحدات الشائعة، المستخدمة للتعبير عن معدل تغلغل وعمق المسافة للتآكل في هذه الحالة هي الحل (1/1000 من inch لكل year ويرمز لها اختصاراً [mpy] .

3- التغير في الخواص الميكانيكية : إن النسبة المئوية للتغير في الخصائص الميكانيكية مثل مقاومة الشد، مقاومة الخضوع، المطيلية أو أي خواص ميكانيكية أخرى يمكن أن تستخدم أحياناً بشكل جيد للتعبير عن معدل التآكل في حالات معينة، وذلك عندما يسبب التآكل تشققات كما في حالة التآكل الإجهادي Stress Corrosion والتعب التآكلي، أو أحياناً عندما يكون التآكل من نوع التآكل من بين الحبيبات Intergranular .

### 3-7 العملية الكهروكيميائية في التآكل:

تحصل عمليات التآكل في محاليل قادرة على نقل الكهرباء تدعى هذه المحاليل الإلكتروليت (Electrolyte) وتتضمن تفاعلات كهرو كيميائية. والمقصود بها التفاعلات التي تتضمن انتقال إلكترونات من منطقة على سطح المعدن تتحرر فيها هذه الإلكترونات ، تسمى المصعد (Anode )، إلى منطقة

أخرى تستهلك فيها هذه الالكترونات، تسمى المهبط (Cathode). ويسمى التفاعل الذي يحصل في منطقة المصعد بالتفاعل الأنودي أو التفاعل المصعدي. إن هذا الانتقال في الالكترونات على سطح المعدن لا يتم إلا إذا كان هنالك محلولاً قادراً على نقل الكهرباء هو الالكترونوليت وهو المحلول المائي عادة. ونقل الكهرباء في المحلول يتم عن طريق وجود الأيونات الموجبة والسالبة المتوفرة في هذا المحلول والذي يشكل سريانها التيار الأيوني ( Ionic Current). أما انتقال الكهرباء على سطح المعدن فيم عن طريق سريان الالكترونات ( تيار الكتروني ). إن سريان هذين التيارين في الوقت ذاته تصاحبه عملية التآكل إذ تتشكل الخلية التآكلية ( Corrosion Cell ) التي تتضمنها كافة أنواع التآكلات، أي التآكلات الكهرو كيميائية.

إن كافة المحاليل المائية، حتى النقية منها نقاوة كافية، من الممكن أن تكون محلول كهربائي (الكتروليت) (electrolyte)، فمثلاً الماء النقي، أي المتعادل (PH=7) يحتوي على مقدار من ذرات الماء المتحللة ، أي على أيونات هيدروجين موجبة (H+) وأيونات هيدروكسيل سالبة (OH-) وهذا يعني أن مثل هذه المحاليل يمكن أن تكون وسطاً تآكلياً في حالة وجود ( أنود وكاتود)، أي منطقة تحصل عندها تفاعلات أنودية (تحرير الالكترونات ) ومنطقة تحصل عندها تفاعلات كاثودية (استهلاك الالكترونات ) .

يبين الشكل 1-7 كيفية انتقال الالكترونات ، على سطح معدن الزنك عند تعرضه إلى حامض هيدروكلوريك (حمض كلور الماء HCl ) مخفف من منطقة الأنود التي يحصل فيها تحلل الزنك إلى أيوناته (التأكسد) إلى منطقة الكاثود والتي يتم فيها استهلاك هذه الالكترونات ( الاختزال ) من قبل أيونات الهيدروجين التي تنتقل إلى هذه المنطقة من داخل المحلول ، والتي يتحرر عندها غاز الهيدروجين [H<sub>2</sub>] في هذه الحالة .

إن منطقة التفاعل الأنودي تشكل الجزء المتآكل من المعدن، في هذه الحالة ويمكن أن تتحول منطقة التفاعل الأنودي هذه إلى منطقة تفاعل كاثودي يتحرر عندها غاز الهيدروجين وبالعكس. كما في حالة التآكل العام للمعدن الذي تكون فيه كافة أجزاء سطح المعدن مناطق تفاعل أنودي وكاثودي في الوقت ذاته .

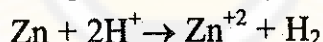
إن جميع حالات التآكل الحر تتضمن تفاعلات أنودية ، أي تأكسد وتفاعلات كاثودية أي اختزال وإن هذه التفاعلات الأنودية الكاثودية تحصل في الوقت نفسه بالسرعة نفسها على سطح المعدن .

### التفاعلات الكهروكيميائية :

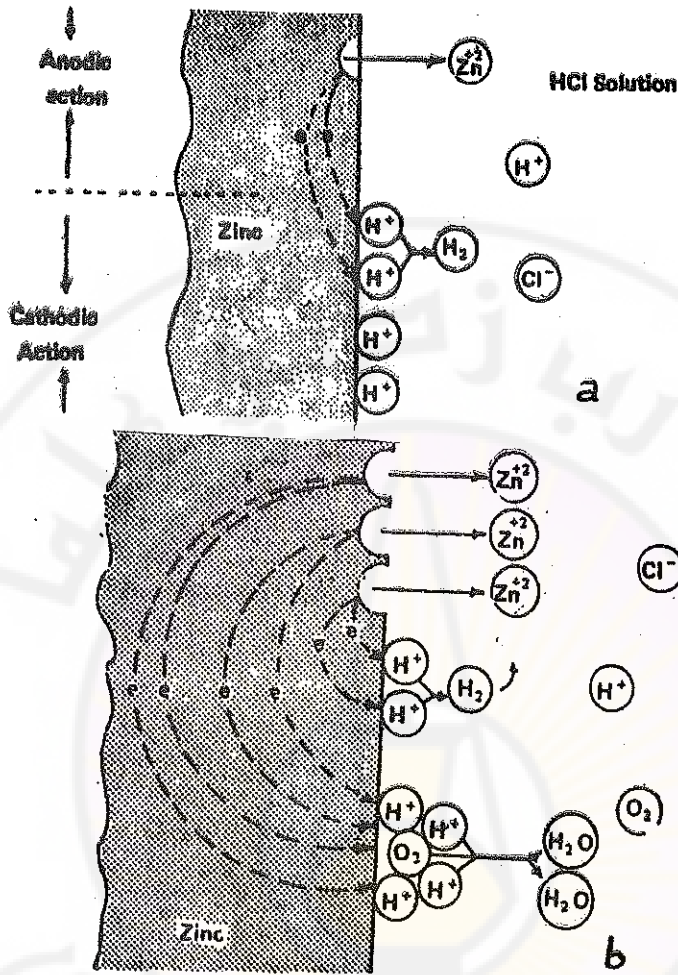
المقصود بالتفاعل الكهروكيميائي ، من الناحية الكيميائية ذلك التفاعل الذي يمكن تجزئته إلى تفاعلين ثانويين هما تفاعل تأكسد (أنودي) وتفاعل اختزال كاثودي. فمثلاً التفاعل الذي يحصل عند غمر قطعة زنك نقي في حامض كلور الماء المخفف ، يمكن وصفه في التفاعل التالي



وهو تفاعل كهروكيميائي ، لأنه يتضمن انتقال إلكترونات على سطح الزنك، كما هو مبين في الشكل 1-7 والذي يمكن تجزئته إلى تفاعلين ثانويين كما يلي:



الناتج من التفاعلين  $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{+2} + 2\text{e}^-$  و  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$



الشكل 1-7

التفاعلات الكهروكيميائية الحاصلة عند غمر قطعة زنك في حمض كلور الماء

a- نقي خال من الأوكسجين b- يحتوي على أوكسجين



وهناك العديد من التفاعلات التي يمكن تقسيمها إلى تفاعلين أنودي وكاثودي أي التي تتضمن تحرير الإلكترونات واستهلاكها على سطح المعدن. ومن أمثلة هذه التفاعلات تفاعل الحديد أو الألمنيوم مع حمض كلور الماء الضعيف الذي يؤدي إلى تآكل الحديد أو الألمنيوم نظراً لأن هذه التفاعلات تتضمن تفاعلات أنودية وأخرى كاثودية وفق المعادلة التالية:

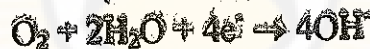


حيث يشير الحرف (n) إلى تكافؤ المعدن الذي هو عدد الإلكترونات لفقدته التي تحرر من ذرة واحدة في هذا التفاعل.

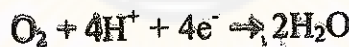
أما التفاعلات الكاثودية التي تصاحب عملية تآكل المعدن، فهي عديدة الأنواع، فمنها ما يكون مثلاً اختزال أيونات الهيدروجين أي عملية تحرير غاز الهيدروجين، التي تصاحب تآكل معدن في المحاليل الحامضية أو قد تكون اختزال الأوكسجين كما في المحاليل المائية المتعادلة أو القاعدية وفيما يلي أنواع التفاعلات الكاثودية الرئيسية هذه :



اختزال الأوكسجين ( محلول قاعدي أو متعادل )



اختزال أوكسجين ( محلول حامضي )



ترسيب معدن  $Cu^{+2} + 2e^{-} \rightarrow Cu$

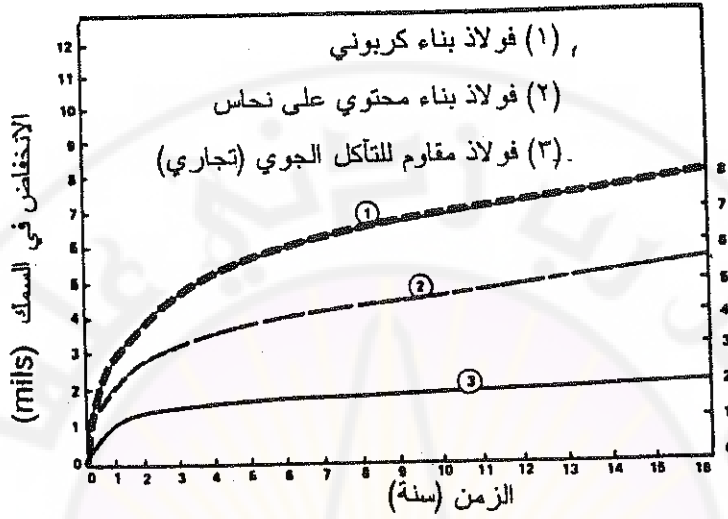
اختزال أيونات معدن  $Fe^{+3} + e^{-} \rightarrow Fe^{+2}$

#### 7-4 التآكل الجوي ATMOSPHERIC CORROSION:

يمكن تقسيم الوسط الجوي المسبب للتآكل إلى: الجوي الصناعي، والجوي البحري. ولكن هذه الأوساط تختلط أحياناً، فيصبح من الصعب تحديد الوسط الجوي بأحد هذه الأنواع الأربعة، وخصوصاً عند وجود الرياح التي تؤدي إلى خلط مكونات أوساط مختلفة، وأن المكونات الرئيسة المسببان للتآكل الكهروكيميائي في كافة أنواع الأوساط هذه، هما الأوكسجين وبخار الماء.

##### الجو الصناعي (Industrial Atmosphere):

يتميز الجو الصناعي عن الأجواء الرئيسية الأخرى باحتوائه على ملوثات تساعد بشكل كبير على التآكل، والتي من أهمها مركبات الكبريت وأكاسيد النتروجين، إن أهم المركبات الكبريتية التي تتكون على سطح المعدن، يكون مصدره ثاني أوكسيد الكبريت ( $SO_2$ ) في الجو والذي ينتج من احتراق الفحم والوقود، والذي يمتص من قبل البخار المتكثف على سطوح دقائق الغبار مكوناً حمض الكبريتوز ( $H_2SO_3$ ) الذي يتأكسد بعمليات تحفيز معينة على سطوح دقائق الغبار إلى حمض الكبريت ( $H_2SO_4$ )، حيث يستقر هذا الحمض الأخير بشكل قطرات دقيقة جداً على السطوح المعدنية المعرضة للجو الصناعي، الذي يحتوي علاوة على هذا الحمض، ثاني أوكسيد الكبريت وحمض الكبريتوز. إن هذه المكونات الرئيسية في الجو الصناعي تشكل مع الضباب أو الرطوبة العالية وسطاً تآكلياً قاسياً، نتيجة لتكثف غشاء مائي رقيق يحوي هذه الملوثات الكبريتية ويستقر على سطح المعدن، مما يؤدي إلى تشكيل محلول كهربائي (الكتروليت) قاسي يساعد على التآكل. ويبين الشكل 7-2 تآكل أنواع مختلفة من الفولاذ الكربوني في جو صناعي.



الشكل 2-7

منحنيات تآكل أنواع مختلفة من الفولاذ الكربوني في جو صناعي

الجو البحري (Marine Atmosphere) :

يتميز الجو البحري باحتوائه على دقائق من الأملاح البحرية وهي الكلوريدات التي تحمل عادة بالرياح لتستقر على سطوح المعادن المعرضة لهذا الجو. إن كمية الملوثات الملحية هذه تقل كلما ابتعدنا عن سواحل البحار والمحيطات وهذه تتأثر بتيارات الرياح.

وتتميز مناطق الجو البحري، التي تكون قريبة جداً من السواحل بتعرضها إلى رشات من هذه المياه، التي يؤدي سقوطها على سطوح المعادن إلى خلق حالة فيزيائية معينة على هذه السطوح تتضمن التبليل والتجفيف المتعاقب، وحين يكون السطح في حالة الجفاف محتوياً على أملاح بحرية. وهذه

المتعاقب، وحين يكون السطح في حالة الجفاف محتوياً على أملاح بحرية. وهذه الحالة هي من الحالات التي تعطي في حصول بعض أنواع التآكل، مثل التآكل الإجهادي، كذلك تتعرض سطوح المعادن القريبة من هذه المناطق إلى رداء المياه المالحة.

#### اختبارات التآكل الجوي:

هناك نوعان أساسيان من اختبارات التآكل القياسية، يعكسان مقاومة المعدن للتآكل الجوي. الأول يتضمن التعريض إلى الظروف الجوية الاعتيادية ويدعى اختبار التعريض (Exposure Test)، ويتضمن فترات تعريض طويلة. أما الثاني فهو الاختبارات السريعة التي تتضمن استخدام أوساط قاسية، تعكس تصرف المعدن في الظروف الجوية الاعتيادية.

إن كلا من هذين النوعين من الاختبارات، هو اختبار قياسي يتضمن استخدام معدن بشكل معين وفي ظروف جوية طبيعية أو ظروف اصطناعية معينة، إن الجهة العلمية التي تشرف عادة على اختبارات التآكل الجوي القياسية هي جمعية الاختبارات والمواد الأمريكية (American Society for Testing and Materials ; ASTM).

يتضمن النوع الأول من اختبارات التآكل الجوي استخدام نماذج إما بشكل لوح أو بشكل نموذج اختبار شد أو نموذج اختبار التآكل الإجهادي. تعرض الألواح إلى الجو بتهيئتها في معلقات، بشكل مائل، مكونة زاوية قدرها [30] مع الاتجاه الأفقي، وحيث يكون السطح المراد دراسة تأثير الظروف الجوية عليه مواجهاً مصدر التلوث الرئيسي. وهذه الألواح تكون عادة ذات طول [6 cm] وعرض [4 cm] وسمك حوالي [0.05 cm]، وتكون معزولة كهربائياً عند تثبيتها في المعلقات. بطريقة بحيث لا تصلها القطرات الساقطة من الألواح الأخرى فوقها.

إن اختبارات التعريض القياسية هذه، تتضمن استخدام نماذج عديدة، كي يتسلفي إزالة بعضها ودراسة تأثير الظروف الجوية في سطحها أو قياس معدل التآكل، بعد فترات زمنية مختلفة هي (1,2,7,20 Years) أو (2,5,10,20 Years). إن فترات التعريض الطويلة هذه تعكس تأثير الظروف بشكل جيد بحيث يطابق الواقع بشكل معقول، لأننا نجد في أغلب الأحيان أن فترات التعريض القصيرة للظروف الجوية الطبيعية، لا تعطي نتائج منطقية، لأن حالة سطح المعدن خلال الأيام الأولى من التعريض تكون مختلفة تماماً عما هي عليه خلال فترة التعريض الطويلة، كذلك فإن حالة الجو المتغيرة دائماً لا تعكس معدل الحالة العامة للجو، إذا كانت فترات التعريض قصيرة. ومع هذا فإن فترات التعريض الطويلة جداً يمكن أن تقودنا في بعض الأحوال إلى نتائج غير صحيحة وذلك عندما يكون التغير مثلاً في الحالة سطح المعدن كبيراً بحيث يؤدي إلى تغير حالته الميتالورجية. ومن الممكن أيضاً أن تؤدي فترة التعريض الطويلة إلى تغير كبير في حالة الجو عما هو عليه عند بدأ التعريض الذي كان يقصد منه حالة جوية معينة. إن قسماً من اختبارات التعريض هذه، تستمر حتى حصول الفشل في النموذج، كما هو الحال في اختبارات التآكل الإجهادي في الجو. ولكن في بعض الاختبارات الأخرى مثل الاختبارات التي تجري على المعادن المطيلية مثلاً، فإن فقدان الوزن أو عمق النقر الحاصل أو التغير في الخواص الميكانيكية، يقاس بشكل دوري بعد أزمنة تعريض معينة وفي بعض الأحيان فإن كافة التغيرات التي تحصل بعد التعريض يشار إليها ضمن نتائج الاختبار.

وهناك نوع آخر من الاختبارات، غير اختبارات التعريض إلى الجو الطبيعي، وهي الاختبارات السريعة التي يعتقد العديد أنها تعكس إلى حد ما في بعض الأحيان سلوك المعدن في حالة معينة لبعض الأجواء ومن أهم أنواع

الاختبارات القياسية هذه والمعتمدة من قبل جمعية الاختبارات والمواد الأمريكية اختبار الرذاذ الملحي أو الضباب الملحي وكذلك اختبار الرطوبة المتناوب على الرغم من تقييس الاختبارات السريعة هذه فإن الدراسات لا تزال جارية حول مدى فائدتها، حيث أنها لا تعكس الظروف الجوية الطبيعية، أي أن تصرف المعدن في ظروف الاختبار السريع هذا لا يطابق في حالات عديدة تصرفه في الجو الاعتيادي. وفي هذا الخصوص أجريت بعض التجارب لتؤكد ذلك، وهو أن نتائج اختبار الرذاذ الملحي الذي أجري على ألواح من الفولاذ، الزنك، عند تعريضهما إلى رذاذ الماء الملحي تركيزه 3%، 5% كلور الصوديوم وكذلك إلى رذاذ ماء البحر الصناعي وماء البحر الطبيعي، لم تأت مطابقة للنتائج الحاصلة عند تعريض ألواح مماثلة من الزنك والفولاذ إلى ماء البحر وذلك بغمرها فيه بشكل طبيعي فسي جو على ارتفاع 80 قدم ثم 800 قدم عن مستوى سطح المحيط.

#### 5-7 التآكل في المياه Corrosion In Water:

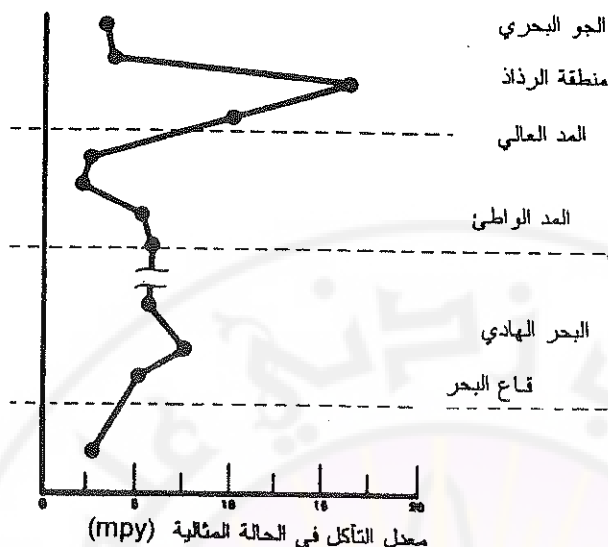
تعد المياه بأنواعها المختلفة أكثر الأوساط التي تستخدم فيها المعادن المختلفة وخاصة الأجزاء المستعملة في الصناعة واستخدامات المياه الرئيسية في الصناعة تكمن في نقل الحرارة وإنتاج البخار. والمياه وسط يستخدم في معظم الصناعات تقريباً مثلاً في العمليات الإنتاجية المختلفة وتبريد الهواء في البيوت والأماكن المختلفة وكوسيط تبريد في محطات توليد القدرة وما إلى غير ذلك، من الصناعات التي تستخدم هذه المياه كأوساط صناعية. كذلك تشكل مياه البحار والأنهار أوساط تتعرض لها الأجزاء المعدنية. وتشكل المياه وسط تآكل قاسٍ للعديد من المعادن، وذلك يعتمد على نوع المياه هذه ودرجة نقاوتها وكمية الملوثات التي تحويها.

## مقاومة المعادن للتآكل في المياه:

إن كافة أنواع المياه تشكل أوساطاً تآكلية بالنسبة للكثير من المعادن. وإن درجة قساوة الوسط المائي تختلف من نوع. ومن أهم العوامل المؤثرة في قساوة الوسط المائي احتواءه على الشوائب أو الملوثات ومن المشاهدات العملية الغربية نجد أن نواتج التآكل للعديد من المعادن في الوسط المائي الحاوية على الملوثات هي مركبات خالية من عناصر هذه الملوثات المساعدة على التآكل ونواتج تآكل المعادن في المياه هي عادة الأكاسيد والهيدروكسيدات.

إن المشاهدات العلمية تشير إلى أن تآكل الفولاذ الكربوني في ماء البحر المحتوي على الأوكسجين هو نفسه تقريباً في الماء النقي المحتوي على الأوكسجين هذا على الرغم من أن ناقلية ماء البحر أعلى مما هي عليه في الماء النقي. ويبين الشكل 3-7 معدل تآكل الفولاذ الكربوني عند أعماق مختلفة من سطح البحر. ويلاحظ من هذا الشكل أن أعلى معدلات التآكل تكون في المنطقة التي فيها رذاذ مائي، وكذلك يلاحظ أيضاً أن هناك نقطة أخرى يكون فيها معدل التآكل أعلى ما يمكن وهي في منطقة البحر الهادئ، ويعود سبب ذلك إلى أن كمية الأوكسجين المذابة في ماء البحر عند ذلك العمق تزداد قليلاً على الرغم من بعدها عن السطح بسبب انخفاض درجة الحرارة في هذه المستويات العميقة.



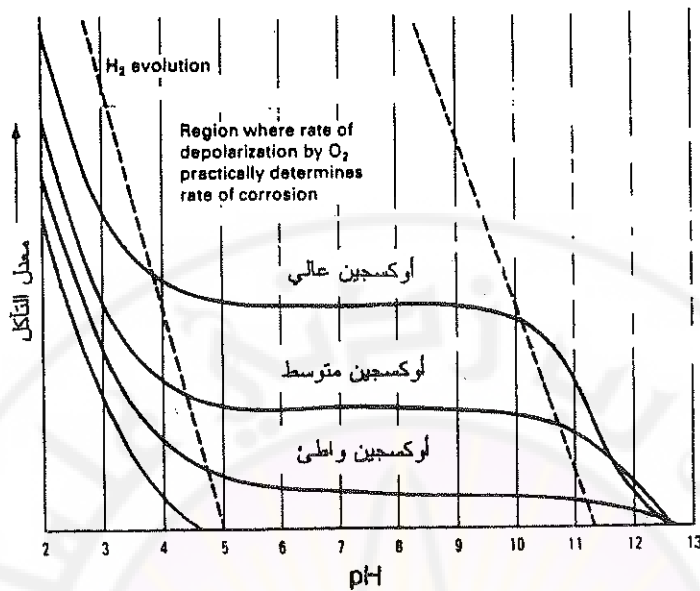


الشكل 3-7

معدل تأكل الفولاذ الكربوني عند أعماق مختلفة من سطح البحر

تتأكل المعادن الحديدية وخاصة الفولاذ الكربوني والحديد الزهر في الماء مكونة نواتج تأكل مختلفة. تعرف بالصدأ وهذا يعتمد على نوع الماء وحالته ومن الناحية النظرية يعد الوسط المائي وسطاً تأكلياً بالنسبة للحديد حتى لو كان الماء في أعلى درجات النقاوة وفي حالة متعادلة ( $PH = 7$ ) وخالياً من الأوكسجين لأن الماء حتى في هذه الحالة يكون متأيناً بدرجة بسيطة. يعتمد معدل تأكل الفولاذ الكربوني في المحاليل المائية كافة عند درجات الحرارة الاعتيادية بشكل كبير على كمية الأوكسجين المذاب في المحلول المائي ويبين الشكل 4-7 معدلات تأكل الفولاذ الكربوني في المحاليل المائية.





الشكل 4-7

معدلات تآكل الفولاذ الكربوني في المحاليل المائية

#### 6-7 التآكل في التربة :CORROSION IN SOIL

التربة وسط، تتعرض له العديد من الأجزاء المعدنية، ومن أهمها الأنابيب والخزانات المدفونة التي تصنع من معادن مختلفة وبعض أنواع الترب تكون أوساطاً تآكلية، أي تشكل الكتروليتاً وذلك يعتمد على طبيعتها الفيزيائية ومكوناتها الكيميائية أي على نوع التربة. إن الخواص الفيزيائية للتربة مثل حجم دقائقها له أهمية كبيرة في تحديد قابليتها في إحداث التآكل لأن حجم دقائقها يؤثر في قابلية التربة على نفاذية الماء والهواء خلالها. فمثلاً تسمح التربة ذات البنية

الغليظة أي المكونة من الرمال والحصى بانتشار ودوران الهواء خلالها وفي هذه الحالة تصبح وسطاً مشابهاً للوسط الجوي. أما التربة الطينية وغضارية فتمتاز بصغر حجم دقائقها وقابليتها لامتصاص الماء والاحتفاظ به مما يؤدي إلى فقرها للتهوية وعدم قدرتها على تصريف المياه. وإن قدرة التربة على التهوية وامتصاص الماء والذي يعتمد على حجم دقائقها وتوزيعها، له أثر كبير في قدرتها في تسبب تآكل المعادن المختلفة.

إن المكونات الكيميائية للتربة عديدة ومختلفة ولكن الذي يهمنا من هذه المكونات تلك التي تذوب في الماء داخل التربة. وأهمها أيونات الهيدروجين والهيدروكسيل أي الأس الهيدروجيني الـ (PH) وكذلك الأوكسجين المذاب والعناصر التي تشكل قواعد مثل الصوديوم والبوتاسيوم والكالسيوم والمغنسيوم والجزور التي تشكل حوامض مثل الكربونات والبيكربونات والكلوريدات والنترات والسلفات.

إن تآكل المعادن في التربة المختلفة يعود سببه أساساً إلى وجود المحلول الكهربائي (الكتروليت) الذي يساعد في نشوء الخلية التآكلية. إن المحلول الكهربائي يشكل وسطاً مائياً حاوياً على الأيونات المختلفة. بناءً على ذلك نجد أن التربة الجافة مثل التربة الرملية هي أوساط لا تساعد على التآكل، كذلك نجد أن خلو ماء التربة من المذيبات المختلفة لا يشكل وسطاً تآكلياً قاسياً شأنه شأن الماء النقي الخالي من الأملاح المذابة والأكسجين.

يمتاز وسط التربة بوجود بعض المظاهر الفيزيائية الخاصة التي من شأنها أن تؤدي إلى حصول خلايا تآكلية تعمل على زيادة معدل تآكل المعدن في هذا الوسط. وهذه المظاهر ينعدم أو يقل حصولها في الأوساط الأخرى. إن الخلايا التآكلية الرئيسية التي تتشكل في بعض التربة وخاصة على سطوح الأجزاء المعدنية المدفونة مثل الأنابيب هي الخلايا الغلفانية (Galvanic Cell)

والخلايا الغلفانية المتسببة عن التيارات الكهربائية المسلطة. وهناك أيضاً أنواع أخرى من الخلايا التآكلية يمكن أن تحصل للأجزاء المعدنية المدفونة مثل خطوط الأنابيب وهي الخلايا الإجهادية وجميع هذه المظاهر تؤدي إلى إحداث فرق في الجهد الكهربائي بين منطقة وأخرى على سطح المعدن أي توليد خلية تآكلية وحصول منطقة ذات جهد كهربائي أعلى (كاثود) من منطقة أخرى ذي جهد أخفض (أنود) على سطح المعدن. وهذا يؤدي إلى زيادة تحلل المعدن في المنطقة ذات الجهد الكهربائي الأقل أي الأنود.

إن الخلايا الغلفانية التي تتكون والتي تسبب فرقاً في الجهد الكهربائي بين منطقة وأخرى تكون في نفس الوقت على أنواع عديدة، فمنها ما ينشأ نتيجة وجود معدنين مختلفين على تماس مع بعضهما في وسط معين، حيث تتكون في هذه الحالة خلية التماس الثنائي والتي تؤدي إلى حصول تآكل موضعي لسطح الأنود يعرف بتآكل التماس الثنائي وفي مختلف الأوساط المسببة للتآكل نتيجة وجود فرق في الجهد بين المعدنين في هذا الوسط (الأكتروليت). وهناك الخلايا الغلفانية الأخرى غير خلايا التماس الثنائي، وهي الخلايا التركيزية والخلايا التركيزية الأوكسجينية أي خلايا التهوية التفاضلية والخلايا الحرارية. وهذه الأنواع الثلاثة من الخلايا الغلفانية تكون شائعة الحصول بدرجة كبيرة في وسط التربة، وأعلى مما هو عليه في الأوساط الأخرى وتعزى إليها العديد من مشاكل التربة خاصة بالنسبة لخطوط الأنابيب الحديدية المدفونة، حيث أن 90% من حالات التآكل في التربة تعود إلى نشوء الخلايا التركيزية والخلايا التركيزية الأوكسجينية. وفرق الجهد بين منطقة وأخرى على سطح الجزء المعدني نفسه، الذي يتسبب عنه نشوء هذه الخلايا يعود إلى الاختلاف في تركيز الأيونات أو الأوكسجين أو درجة الحرارة في التربة المعرض إليها المعدن المدفون، حيث ينشأ عن ذلك أقطاب مختلفة (أي مناطق ذات جهود مختلفة) مما يؤدي إلى

نشوء خلايا تركيزية أو خلايا تركيزية أوكسجينية أو خلايا حرارية على التعاقب.

#### تآكل خطوط الأنابيب المدفونة:

إن أكثر الأجزاء المعدنية التي تستخدم في وسط التربة، هي خطوط الأنابيب (Pipeline) وأجزائها عندما تكون مدفونة. وهذه الأنابيب المعدنية وأجزائها تصنع في الغالب من الفولاذ أو الحديد الزهر وعادة ما تكون محمية بالطلاء أو الحماية الكاثودية أو كليهما معاً، أو قد تستخدم بدون حماية وذلك يعتمد على نوع التربة وعلى نوع المادة التي ينقلها خط الأنابيب.

إن كافة أنواع الخلايا التآكلية يمكن أن تتكون على سطح خط الأنابيب لأن امتداد خط الأنابيب لمسافات طويلة في التربة يقضي تعرضها إلى أنواع مختلفة من الترب التي تختلف في مكوناتها الكيميائية، مما يؤدي إلى نشوء خلايا تركيزية عديدة في ذات الوقت. أو قد تكون هذه الترب التي يمر فيها الأنبوب مختلفة في خواصها الفيزيائية مما يؤدي إلى اختلاف القابلية لامتصاص الأوكسجين وهذا الأمر الذي بدوره يؤدي إلى نشوء خلايا تركيزية أوكسجينية على سطح خط الأنابيب المدفون هذا. كذلك من الممكن أن تنشأ خلايا تماس ثنائي نتيجة وجود أكثر من نوع واحد من المعدن يتشكل منه خط الأنبوب هذا أو أن تشكل طبقات سطحية (نواتج تآكل أو ترسبات من التربة) على بعض مناطق سطح الأنبوب يؤدي إلى تغيير قيمة الجهد في هذه المنطقة عما هو عليه للمعدن الأساس الذي يكون معرضاً للتربة في منطقة أخرى وهذا الأمر يؤدي في هذه الحالة إلى نشوء خلايا تماس ثنائي أيضاً. وقد تتكون خلايا إجهادية نتيجة وجود مناطق لحام أو انثناءات أو حني، تكون خطوط الأنابيب قد تعرضت لها خلال عمليات التشكيل.

إن نشوء هذه الخلايا على سطح خطوط الأنابيب يؤدي إلى حصول أنواع من التآكلات الموضعية في خطوط الأنابيب وهي النقر (Pits) وفي منطقة الأنود الذي يؤدي إلى حصول التسرب (Leakage). كذلك يمكن أن يحصل التلف الهيدروجيني (Hydrogen Damage) في مناطق الكاثود بسبب وجود الهيدروجين الذري المتحرر في تلك المناطق نتيجة التفاعلات الكاثودية الحاصلة عليها.

وتتميز الخلايا التآكلية، التي تتشكل على سطوح الأنابيب المدفونة، بأن أقطابها (أي الأنود والكاثود)، تفصل بينها مسافات قد تكون بضع سنتيمترات أو عدة كيلومترات. كذلك فإن قدرة هذه الخلية على إحداث التآكل الذي يعتمد على قيمة فرق الجهد بين الكاثود والأنود يكون مختلفاً فقد يتراوح فرق الجهد بين عدة ملي فولت إلى 500 ملي فولت. ومناطق الأنود أو الكاثود لهذه الخلايا قد تشمل منطقة صغيرة جداً فقط أو قد تشمل منطقة كبيرة نسبياً من سطح خط الأنابيب وكل هذه العوامل بالتأكيد تؤثر في معدل التآكل الموضعي على سطح الأنبوب كذلك نجد بأنه حال بدء التآكل لبعض مناطق سطح خط الأنابيب المدفون أي بدء نشاط التفاعلات الكهروكيميائية (الأنودية والكاثودية معاً)، فإن تغيرات قد تحصل من شأنها أن تؤدي إلى تغير جهد الخلية ومقاومتها الكهربائية وهذه التغيرات سببها تغير تركيز المكونات الكيميائية للتربة بسبب تآكل الأنود (التفاعلات الأنودية) والتفاعلات الكاثودية. وجهد الخلية في هذه الحالة قد يزداد أو ينقص اعتماداً على نوع التفاعلات الحاصلة ونوع التربة وإن تغير الجهد أحياناً يكون كبير نسبياً بحيث يحصل تبادل في القطبية أي تصبح مناطق الأنود كاثوداً وبالعكس.

وبشكل عام نجد إن مساحة المناطق التي تشكل الأنود على سطح خطوط الأنابيب تتناقص بمرور الزمن، أي باستمرار عملية التآكل لهذه المنطقة.

نتيجة لترسيب نواتج التآكل التي تشكل طبقات سطحية واقية في بعض أجزاء منطقة الأنود وهذا يعني بأنه عندما لا يبقى معدل التآكل لمنطقة الأنود هذه ثابتاً أي يتناقص بمرور الزمن في هذه المنطقة فإن معدل التآكل يصبح كبيراً في المنطقة الصغيرة المتبقية من الأنود، أي أن التآكل يتمركز في المنطقة الصغيرة المتبقية، مما يؤدي إلى ثقب الأنبوب، أي وصول التآكل إلى الجهة الثانية منه المعرضة للوسط الآخر وهو المادة المنقولة، وحصول التسرب.

#### حماية خطوط الأنابيب المدفونة:

تحمى خطوط الأنابيب المدفونة من التآكل، إما بالطلاء، أو الحماية الكاثودية. ويشترط في طبقة الطلاء أن تكون متماسكة ومن النوع الذي لا يسمح بمرور الماء، كي توفر عزلاً تاماً عن التربة (المنحل الكهربائي - الألكتروليت) لتوفير الحماية الجيدة لخطوط الأنابيب. ويشترط أن تكون خواص طبقة الطلاء مستمرة بهذا الشكل طالما بقي الأنبوب في الخدمة. ومن الناحية العملية لا يتوفر طلاء بهذا الكمال التام إلا بكلف عالية جداً. وفي بعض الحالات يمكن استخدام طلاء أقل جودة ولكن مع توفير حماية كاثودية للحد من التآكل بشكل مقبول. وفي بعض الأحيان تكون الحماية الكاثودية وحدها كافية لتوفير الحماية المطلوبة.

وعموماً ومن الناحية النظرية تؤدي حماية خطوط الأنابيب بطريقة الطلاء وحده إلى تقليل عدد التسربات الحاصلة على الرغم من أن المشاهدات العملية تشير إلى أن الفترة اللازمة لحصول أول تسرب لخط الأنابيب المطلي في حالة حصوله، تكون عادة أقل مما هي عليه في الخط غير المطلي. وتفسير ذلك ببساطة، هو أن طبقة الطلاء هذه ربما تحوي على عدد قليل من الثقوب، وهذا ما نجده عادة في غالبية أنواع الطلاء، وهذا من شأنه أن يؤدي إلى تركيز

التفاعل الأسود في هذه الثقوب مما يؤدي إلى حصول التسرب خلال فترة  
زمنية أقل.







## الفصل الثامن الحديد والفولاذ

1.8 مخطط الحديد والكربون

2.8 المعالجات الحرارية للحديد والفولاذ

3.8 تصنيف الفولاذ



## الحديد والفولاذ

### Iron and Steel

يعتبر الحديد أهم معدن عرفته الصناعة حتى الآن. وأهم العناصر الموجودة معه بشكل دائم هو الكربون، إذ لا يمكن وجود نوع من الحديد أو الفولاذ يخلو من هذا العنصر الذي يحدد بنسبته الموجود فيها مع الحديد خواص هذا المعدن أو الخليطة المكونة من هذين العنصرين. كما تحدد نسبة الكربون تسمية الخليطة إذ جرت العادة أن تسمى خليطة الحديد والكربون التي تقل فيها نسبة الكربون عن 2.06% بالفولاذ، وما فوق هذه النسبة بالحديد الصب (الفونت). ولمعرفة خواص أنواع الحديد المختلفة باختلاف نسبة الكربون لا بد من التعرف على مخطط التوازن لهذين العنصرين.

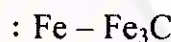
#### 8 - 1 مخطط توازن الحديد والكربون :

إن أقرب مخططات التوازن للواقع هو المخطط المزدوج. الموضح في الشكل 8-1 والذي أتفق على تسمية نقاطه دولياً، ونرى أن المخطط لا يبين سوى جزء من مخطط التوازن لخليطة الحديد والكربون وذلك اعتباراً من 100% حديد حتى فقط 6.67% كربون ذلك لعدم أهمية الخلائط من الناحية العملية. ينجم ازدواج مخطط الحديد والكربون عن أن الكربون يمكن أن يتبلور بأحد شكلين: إما بشكل كربون صاف (غرافيت) أو بشكل كربيد الحديد  $Fe_3C$  وبهذا فإن درجات الحرارة التي يبدأ عندها الغرافيت بالتبلور أو بالانفصال عن المحلول الصلب هي غير تلك الدرجات في حالة تبلوره على شكل كربيد الحديد، لذلك لدينا مخططان للحديد والكربون أحدهما للحديد والكربيد (ويسمى مخطط التوازن الحرج) والثاني للحديد والكربون (ويسمى مخطط التوازن التام)، وقد

رسماً في نفس المخطط، وتلك المنحنيات التي تختلف بين المخطط الأول والثاني حيث رسمت بخط متصل للمخطط الأول وبخط متقطع فيما يتعلق بالمخطط الثاني أما باقي الخطوط والمنحنيات فهي مشتركة بين المخططين. ويمكن معرفة النوع الذي تبلورت فيه خليطة حديدية ما دون فحصها مجهرياً وذلك بالنظر إلى سطح مكسرها فإذا كانت قد تبلورت حسب مخطط الحديد والغرافيت فإن لون المكسر يكون رصاصياً قائماً لوجود حبيبات من الغرافيت، أما إذا كانت قد تبلورت حسب المخطط الآخر فإن سطح مكسرها يكون بلون فضي لامع.

### 8 - 1 - 1 مخطط توازن الحديد والكربون الحرج :

لفهم مخطط التوازن هذا لا بد من أن نشرح المركبات التي تشكل البنية



#### 1. الحديد النقي Fe:

لا يمكن للحديد أن يتواجد بشكل نقي إلا نظرياً لأنه يحتوي دائماً كمية محددة من العناصر الأخرى ولكن حالياً يمكن الحصول على حديد عالي النقاوة مخبرياً بكميات قليلة بحيث لا تتعدى نسبة العناصر التي تدخل في تركيبه 0.01% . إن الحديد النقي طري وقابليته للتشكيل كبيرة، ويمكن للفولاذ الصافي أن تكون مقاوته كحد أعظمي بحدود 99.9% أي أنه يحتوي 0.1% من العناصر الأخرى التي تكون دائماً مترافقة مع الحديد مثل الكربون والمنغنيز والسليكون والنحاس. ينصهر الحديد النقي عند درجة حرارة تساوي 1539 درجة مئوية ويتكون الحديد في الحالة الصلبة من وضعيين متبدلين هما  $Fe-\alpha$  و  $Fe-\gamma$  .

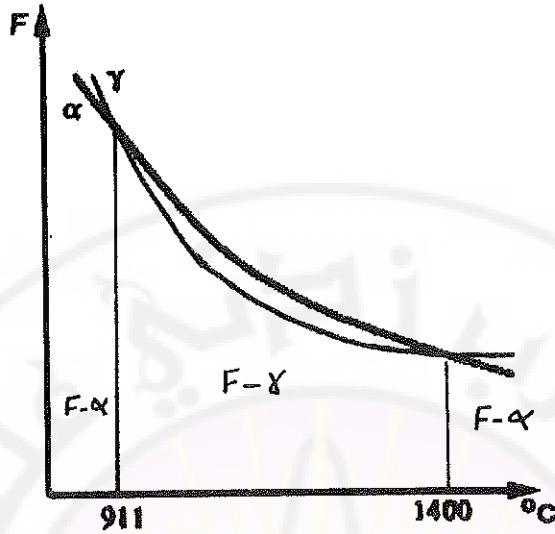


### مخطط التوازن المزدوج للحديد والكربون

تكون الهياكل الشبكية لحديد  $\gamma$  من نوع مكعب متركز وجهياً ويكون في حالة التوازن ضمن المجال الحراري بين 911 - 1400 درجة مئوية. أما حديد  $\alpha$  فتكون هياكله الشبكية من نوع مكعب متركز جدياً ويكون متوازن ضمن مجالين حراريين الأول في درجات الحرارة الواقعة تحت 911 درجة مئوية والمجال الثاني بين 1400 - 1539 درجة مئوية ( ويسمى حديد  $\delta$  ). يمكن توضيح هذه الظاهرة على أساس قوانين القدرة الحرة، حيث أن قيمة القدرة الحرة F للحديد Fe- $\gamma$  تكون أصغر ما يمكن ضمن المجال الحراري الواقع بين 911 - 1400 م° وعند المجالات الحرارية الباقية تكون القدرة الحرة للحديد Fe- $\alpha$  أصغر ( هذا موضح في الشكل 8-2 ). ويوضح الجدول 8-1 الخواص الميكانيكية للحديد النقي حيث تعتبر هذه القيم تقريبية إذ أنه يمكن أن تؤثر على خواص الحديد  $\alpha$  عدة عوامل أخرى غير نقاوته مثل حجم البلورات.

الجدول 8-1 : الخواص الميكانيكية للحديد النقي

|                                         |             |
|-----------------------------------------|-------------|
| $\sigma_{pt} = 18 - 25 \text{ kg/mm}^2$ | حد المتانة  |
| $\sigma_{02} = 10 - 14 \text{ kg/mm}^2$ | حد الانسياب |
| $\delta = 50 \%$                        | الاستطالة   |
| $\psi = 85 \%$                          | التقلص      |
| HB = 60                                 | القساوة     |



الشكل 2-8

تغير القدرة الحرة للحديد النقي

## 2. الفريت Fe-α :

إن قطر ذرة الكربون بشكل حر يساوي  $1.54 \text{ \AA}$  ، ويوجد في الهيكل الشبكي المكعب المتمركز حجمياً 12 تجويفاً صغيراً قطرها كل منها يساوي  $0.62 \text{ \AA}$  . نلاحظ من ذلك أن التجويف صغير بحيث لا يتسع لذرة كربون وبالتالي لا يمكن نظرياً أن تنحل ذرات الكربون في الحديد. لكن في الحقيقة يوجد انحلال للكربون في الحديد وإن كان بنسب صغيرة جداً واقعة ضمن المجال  $0.01\%$  حتى  $0.19\% \text{ C}$  وتفسير ذلك التناقض هو وجود العيوب في الهياكل الشبكية، وبذلك يتشكل لدينا المحلول الصلب Fe-α الفريت. ونظراً لكمية الكربون القليلة القابلة للانحلال في الفريت لذلك يمكننا اعتبار الفريت حديداً نقياً وخاصة أن مواصفاته لا تختلف كثيراً عن خواص الحديد النقي، حيث أن متانته

حوالي  $\sigma_{ut} = 29 \text{ kg/mm}^2$  واستطالته كبيرة  $\delta = 50\%$  والعمل النوعي  
للصدم  $a = 300 \text{ J.cm}^{-2}$ .

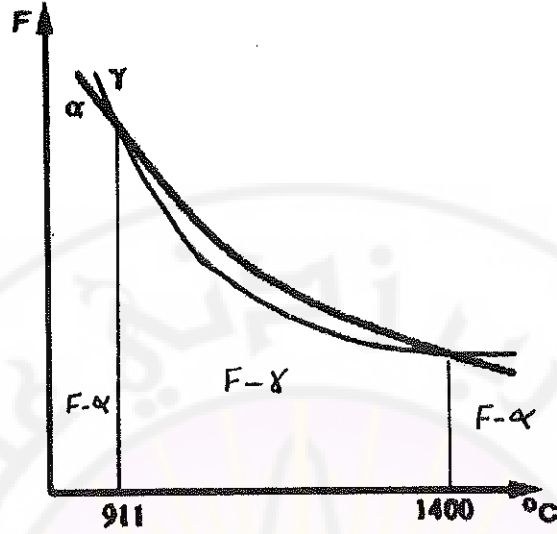
### 3. الأوستنيت Fe- $\gamma$ :

هو المحلول الصلب  $\gamma$  حيث تتحل نسبة من الكربون في الحديد. وبالرغم من أن الهيكل الشبكي للحديد  $\gamma$  أصغر إلا أن انحلال الكربون فيه أكبر من انحلاله في الحديد  $\alpha$ . تبلغ أعلى نسبة لانحلال الكربون في حديد  $\gamma$  حوالي  $C = 2.06\%$  عند درجة حرارة  $1147^\circ\text{C}$  أي في النقطة E في مخطط التوازن. يمتلك الأوستنيت قابلية جيدة للتشكيل أي أنه عالي اللدونة وقساوته صغيرة وكذلك حد الانسياب (الخصوع) صغير. ويمكننا مشاهدة البنية المجهرية للأوستنيت فقط باستخدام المجاهر الحرارية.

### 4. السمنتيت $\text{Fe}_3\text{C}$ :

هو مركب كيميائي ناتج عن تفاعل الحديد مع الكربون، بنيته البلورية معقدة (ثمانية الأضلاع)، ذو قساوة كبيرة تتراوح بين  $860 - 660 \text{ HB}$ ، وهو غير قابل للتشكيل. تدعى جزيئات السمنتيت التي تنفصل مباشرة من المعدن المنصهر عند تبريده بالسمنتيت الأولي أما السمنتيت الناتج عن تبريد الأوستنيت يكون ناعماً ويدعى السمنتيت الثانوي. وهناك نوع ثالث عبارة جزيئات مشتتة نسبتها قليلة تنفصل عن الفريت عند التبريد وتدعى السمنتيت الثالثي. وبالإضافة إلى الأنواع الثلاثة المذكورة فإن السمنتيت في مخطط التوازن ينفصل بشكل يوتكتيكي مشكلاً مع الأوستنيت اللديبوريت ويكون السمنتيت هنا ناعماً. ويتشكل أيضاً السمنتيت اليوتكتويدي الذي يؤلف مع الفريت ما يسمى بالبرليت ويكون عبارة عن صفائح متداخلة بين الفريت أو يكون بشكل كروي. ينصهر السمنتيت عند درجة حرارة  $1600^\circ\text{C}$  درجة مئوية وليس له تحول طور (التروبي) في درجات الحرارة المنخفضة، ويبلغ وزنه النوعي  $7.82 \text{ kg/cm}^3$ . يمكن أن





الشكل 2-8

تغير القدرة الحرة للحديد النقي

## 2. الفريت Fe-α :

إن قطر ذرة الكربون بشكل حر يساوي  $1.54 \text{ \AA}$  ، ويوجد في الهيكل الشبكي المكعب المتمركز حجمياً 12 تجويفاً صغيراً قطر كل منها يساوي  $0.62 \text{ \AA}$  . نلاحظ من ذلك أن التجويف صغير بحيث لا يتسع لذرة كربون وبالتالي لا يمكن نظرياً أن تنحل ذرات الكربون في الحديد. لكن في الحقيقة يوجد انحلال للكربون في الحديد وإن كان بنسب صغيرة جداً واقعة ضمن المجال  $0.01\%$  حتى  $0.19\% \text{ C}$  وتفسير ذلك التناقض هو وجود العيوب في الهياكل الشبكية، وبذلك يتشكل لدينا المحلول الصلب Fe-α الفريت. ونظراً لكمية الكربون القليلة القابلة للانحلال في الفريت لذلك يمكننا اعتبار الفريت حديداً نقياً وخاصة أن مواصفاته لا تختلف كثيراً عن خواص الحديد النقي، حيث أن متانته

حوالي  $\sigma_{ut} = 29 \text{ kg/mm}^2$  واستطالته كبيرة  $\delta = 50 \%$  والعمل النوعي  
للصدم  $a = 300 \text{ J.cm}^{-2}$ .

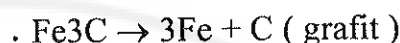
### 3. الاوستنيت Fe- $\gamma$ :

هو المحلول الصلب  $\gamma$  حيث تنحل نسبة من الكربون في الحديد. وبالرغم من أن الهيكل الشبكي للحديد  $\gamma$  أصغر إلا أن انحلال الكربون فيه أكبر من انحلاله في الحديد  $\alpha$ . تبلغ أعلى نسبة لانحلال الكربون في حديد  $\gamma$  حوالي  $2.06 \%$  عند درجة حرارة  $1147^\circ \text{C}$  أي في النقطة E في مخطط التوازن. يمتلك الاوستنيت قابلية جيدة للتشكيل أي أنه عالي اللدونة وقساوته صغيرة وكذلك حد الانسياب (الخصوع) صغير. ويمكننا مشاهدة البنية المجهرية للاوستنيت فقط باستخدام المجاهر الحرارية.

### 4. السمنتيت $\text{Fe}_3\text{C}$ :

هو مركب كيميائي ناتج عن تفاعل الحديد مع الكربون، بنيته البلورية معقدة (ثمانية الأضلاع)، ذو قساوة كبيرة تتراوح بين  $860 - 660 \text{ HB}$ ، وهو غير قابل للتشكيل. تدعى جزيئات السمنتيت التي تنفصل مباشرة من المعدن المنصهر عند تبريده بالسمنتيت الأولي أما السمنتيت الناتج عن تبريد الاوستنيت يكون ناعماً ويدعى السمنتيت الثانوي. وهناك نوع ثالث عبارة عن جزيئات مشتتة نسبتها قليلة تنفصل عن الفريت عند التبريد وتدعى السمنتيت الثالثي. وبالإضافة إلى الأنواع الثلاثة المذكورة فإن السمنتيت في مخطط التوازن ينفصل بشكل يوتكتيكي مشكلاً مع الاوستنيت اللديبوريت ويكون السمنتيت هنا ناعماً. ويتشكل أيضاً السمنتيت اليوتكتويدي الذي يؤلف مع الفريت ما يسمى بالبرليت ويكون عبارة عن صفائح متداخلة بين الفريت أو يكون بشكل كروي. ينصهر السمنتيت عند درجة حرارة  $1600$  درجة مئوية وليس له تحول طور (التروبي) في درجات الحرارة المنخفضة، ويبلغ وزنه النوعي  $7.82 \text{ kg/cm}^3$ . يمكن أن

يشكل السمنتيت محلولاً صلباً تبادلياً إذ يمكن أن تتبدل ذرات الكربون بذرات أخرى من الآزوت أو الأكسجين. يعتبر السمنتيت طوراً غير متوازن ويمكن أن يتحلل بعد تسخينه إلى ما فوق 400 درجة مئوية مشكلاً الفحم الحر بشكل غرافيت حسب المعادلة:



يبين الشكل 1-8 ( الصور المجهرية أسفل مخطط التوازن ) التبدلات التي تطرأ على بنية الحديد بازدياد نسبة الكربون فيه. حيث توضح الصورة رقم 1 المجال الذي يتشكل فيه الفريت النقي ونجد أعلى نسبة لانحلال الكربون عند النقطة P ( 0.02 % C ) وعند درجة حرارة 723 درجة مئوية. وتظهر في البنية حدود بلورات Fe- $\alpha$  الناتجة عن التبريد البطيء للآوستنيت ويتوضع الكربون على حدود البلورات بشكل سمنتيت ثالثي. تمثل الصور 2 ، 3 ، 4 أشكال البنية الواقعة ضمن المجال الهيبويوتكتويدي ( ما قبل اليوتكتويد ) وتكون البنية مكونة من الفريت والبرليت. ونلاحظ أنه كلما ازدادت نسبة الكربون تزداد المساحة التي يحتلها البرليت وتتناقص نسبة الفريت حتى الصفر ( الصورة رقم 5 والتي تمثل تركيب اليوتكتويد الذي نسبة الكربون فيه إلى 0.85 % النقطة S والبنية تكون بكاملها من البرليت ). وتسمى خلائط الحديد مع الكربون حتى نسبة كربون 0.85 % ( بين P و S ) بالفولاذ الهيبويوتكتويدي وتسمى عند النقطة S بالفولاذ اليوتكتويدي أما بين النقطة ( 0.85 % C ) S والنقطة P ( 2.06 % C ) فتسمى هذه الخلائط بالفولاذ الهيبريوتكتويدي. تمثل الصورة 6 الفولاذ الهيبريوتكتويدي ( ما بعد اليوتكتويد ) المتكون من البرليت والسمنتيت الثانوي. عند تبريد الآوستنيت الذي تكون نسبة الكربون فيه واقعة ضمن المجال 0.85 % - 2.06 % فإن السمنتيت الثانوي ينفصل على المنحني ES ويتوضع

على حدود بلورات الأوستنيت ويتحول الأوستنيت في داخل البلورة إلى برليت يوتكتويدي.

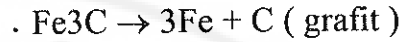
تسمى خلائط الحديد والكربون التي تكون نسبة الكربون فيها بين 2.06 % - 6.67 % بالحديد الصلب. تمثل الصورة رقم 7 الحديد الصلب الهيبريوتكتيكي (ما قبل اليوتكتيك) التي نسبة الكربون فيها واقعة ضمن المجال 2.06 % - 4.3 % وتتكون بنية هذا الحديد من البرليت والسمنتيت الثانوي والديبوريت. نلاحظ عند تبريد عينة من حالة الانصهار أنه عند بداية التبلور ينفصل الحديد  $\gamma$  بشكل غصني نسبة الكربون فيه 2.06 % والباقي من السائل سوف يتحول إلى بنية يوتكتيكية هي اللديبوريت. ويحدث التفاعل اليوتكتيكي عند نسبة كربون 4.3 % (الصورة رقم 8) التي يتكون عندها اللديبوريت وهو عبارة عن أوستنيت وسمنتيت. تسمى خلائط الحديد والكربون (الصورة رقم) التي تكون نسبة الكربون فيها أكثر من 4.3 % وحتى 6.67 % بالحديد الصلب الهيبريوتكتيكي (ما بعد اليوتكتيك) وتتكون بنيته من السمنتيت الأولي الذي ينفصل مباشرة من المعدن المنصهر حتى خط التحول (التفاعل) اليوتكتيكي (عند درجة حرارة 1147 درجة مئوية) حيث يتم التحول اليوتكتيكي لباقي السائل ويتشكل اللديبوريت.

لتوضيح مراحل التبريد والتبلور (تشكل البنيات المتوازنة) لبعض خلائط الحديد ندرس مجموعة من العينات من مناطق مختلفة على مخطط التوازن الحرج ونرمز لهذه العينات بالرموز من  $Z_1$  وحتى  $Z_2$  (الشكل 8-3) ونرسم منحنيات التبريد الموافقة لكل من العينات.

الخليطة  $Z_1$  :

نسبة الكربون في هذه العينة أقل من 0.02 %. يكون المعدن في درجات الحرارة التي فوق النقطة 1 بشكل سائل منصهر متجانس. يبدأ تبلور

يشكل السمنتيت محلولاً صلباً تبادلياً إذ يمكن أن تتبدل ذرات الكربون بذرات أخرى من الأزوت أو الأكسجين. يعتبر السمنتيت طوراً غير متوازن ويمكن أن يتحلل بعد تسخينه إلى ما فوق 400 درجة مئوية مشكلاً الفحم الحر بشكل غرافيت حسب المعادلة:



يبين الشكل 8-1 ( الصور المجهرية أسفل مخطط التوازن ) التبدلات التي تطرأ على بنية الحديد بازدياد نسبة الكربون فيه. حيث توضح الصورة رقم 1 المجال الذي يتشكل فيه الفريت النقي ونجد أعلى نسبة لاندخال الكربون عند النقطة P ( 0.02 % C ) وعند درجة حرارة 723 درجة مئوية. وتظهر في البنية حدود بلورات Fe-α الناتجة عن التبريد البطيء للأوستنيت ويتوضع الكربون على حدود البلورات بشكل سمنتيت ثالثي. تمثل الصور 2 ، 3 ، 4 أشكال البنية الواقعة ضمن المجال الهيبويوتكتويدي ( ما قبل اليوتكتويد ) وتكون البنية مكونة من الفريت والبرليت. ونلاحظ أنه كلما ازدادت نسبة الكربون تزداد المساحة التي يحتلها البرليت وتتناقص نسبة الفريت حتى الصفر ( الصورة رقم 5 والتي تمثل تركيب اليوتكتويد الذي نسبة الكربون فيه إلى 0.85 % النقطة S والبنية تكون بكاملها من البرليت ). وتسمى خلأط الحديد مع الكربون حتى نسبة كربون 0.85 % ( بين P و S ) بالفولاذ الهيبويوتكتويدي وتسمى عند النقطة S بالفولاذ اليوتكتويدي أما بين النقطة ( 0.85 % C ) S والنقطة P ( 2.06 % C ) فتسمى هذه الخلأط بالفولاذ الهيبريوتكتويدي. تمثل الصورة 6 الفولاذ الهيبريوتكتويدي ( ما بعد اليوتكتويد ) المتكون من البرليت والسمنتيت الثانوي. عند تبريد الأوستنيت الذي تكون نسبة الكربون فيه واقعة ضمن المجال 0.85 % - 2.06 % فإن السمنتيت الثانوي ينفصل على المنحني ES ويتوضع

على حدود بلورات الأوستنيت ويتحول الأوستنيت في داخل البلورة إلى برليت يوتكتويدي.

تسمى خلائط الحديد والكربون التي تكون نسبة الكربون فيها بين 2.06 % - 6.67 % بالحديد الصلب. تمثل الصورة رقم 7 الحديد الصلب الهيبويوتكتيكي (ما قبل اليوتكتيك) التي نسبة الكربون فيها واقعة ضمن المجال 2.06 % - 4.3 % وتتكون بنية هذا الحديد من البرليت والسمنتيت الثانوي والديبوريت. نلاحظ عند تبريد عينة من حالة الانصهار أنه عند بداية التبلور ينفصل الحديد  $\gamma$  بشكل غصني نسبة الكربون فيه 2.06 % والباقي من السائل سوف يتحول إلى بنية يوتكتيكية هي اللديبوريت. ويحدث التفاعل اليوتكتيكي عند نسبة كربون 4.3 % (الصورة رقم 8) التي يتكون عندها اللديبوريت وهو عبارة عن أوستنيت وسمنتيت. تسمى خلائط الحديد والكربون (الصورة رقم) التي تكون نسبة الكربون فيها أكثر من 4.3 % وحتى 6.67 % بالحديد الصلب الهيبريوتكتيكي (ما بعد اليوتكتيك) وتتكون بنيته من السمنتيت الأولي الذي ينفصل مباشرة من المعدن المنصهر حتى خط التحول (التفاعل) اليوتكتيكي (عند درجة حرارة 1147 درجة مئوية) حيث يتم التحول اليوتكتيكي لباقي السائل ويتشكل اللديبوريت.

لتوضيح مراحل التبريد والتبلور (تشكل البنيات المتوازنة) لبعض خلائط الحديد ندرس مجموعة من العينات من مناطق مختلفة على مخطط التوازن الحرج ونرمز لهذه العينات بالرموز من  $Z_1$  وحتى  $Z_2$  (الشكل 3-8) ونرسم منحنيات التبريد الموافقة لكل من العينات.

الخليطة  $Z_1$  :

نسبة الكربون في هذه العينة أقل من 0.02 %. يكون المعدن في درجات الحرارة التي فوق النقطة 1 بشكل سائل منصهر متجانس. يبدأ تبلور

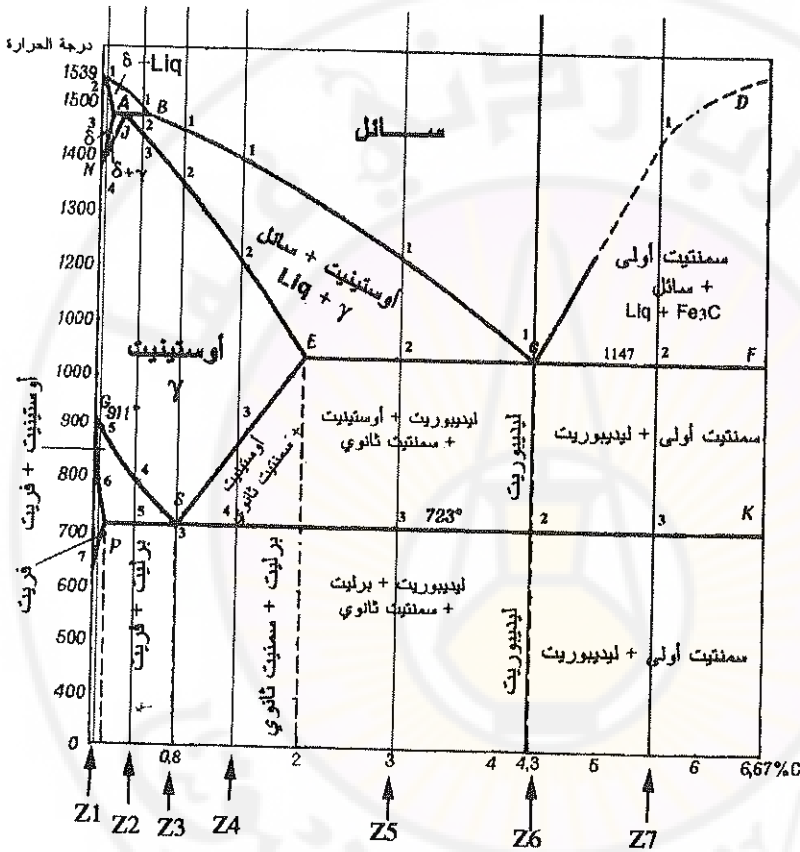
حديد  $\delta$  في النقطة 1 الواقعة على خط الانصهار وينتهي التبلور في النقطة 2 . ويمكن باستخدام قانون العتلة حساب النسب الوزنية للأطوار الموجودة ضمن هذا المجال. ولا يحدث أي تبدل طوري في المجال الواقع بين النقطتين 2 و 3 فقط يتم تبريد حديد  $\delta$  المتشكل مما يؤدي إلى تناقص أبعاد الهياكل الشبكية. تحت النقطة 3 مباشرة تحدث عملية إعادة التبلور حيث يتم تحول حديد  $\delta$  إلى اوستنيت  $\gamma$  ، وبانخفاض درجة الحرارة فإن عملية التحول تستمر وتزداد كمية الاوستنيت. تنتهي في النقطة 4 عملية التحول ويكون قد تشكل اوستنيت متجانس قليل الكربون. في المجال الحراري بين النقطتين 4 و 5 يتم تبريد الاوستنيت ويترافق مع ذلك تقلص في أبعاد الهياكل الشبكية. إن التغير الطوري المهم يحدث تماماً تحت النقطة 5 حيث يتحول الاوستنيت إلى فريت. وتتألف الخليطة في المجال الحراري بين النقطتين 5 و 6 من طورين هما الاوستنيت  $\gamma$  والفريت  $\alpha$  .

وتصبح البنية تحت النقطة 6 عبارة عن فريت متجانس وباستمرار التبريد تتغير قابلية انحلال الكربون في الفريت. ويكون الفريت عند النقطة 7 مشبعاً بالكربون لذلك عند استمرار التبريد فإنه يتشكل من الكربون الفائض ما يسمى بالسمنتيت الثالثي، وبذلك تكون البنية النهائية لهذه الخليطة عند درجات الحرارة العادية عبارة عن فريت وسمنتيت ثالثي ويوضح الشكل 8-4 البنية المجهرية لعينة نسبة الكربون فيها 0.01 % ومنحني تبريدها ( الأرقام على منحني التبريد توافق الأرقام على محور الخليطة في الشكل 8-3 ).

الخليطة  $Z_2$  :

تقع هذه الخليطة في المجال الهيبويوتكتويدي ونسبة الكربون فيها ما بين 0.02 % - 0.85 % . وتكون الخليطة في درجات الحرارة التي أعلى من النقطة 1 عبارة عن سائل منصهر متجانس ( الشكل 8-5 والشكل 8-3 ).

يبدأ تماماً تحت النقطة 1 انفصال بلورات  $\delta$  . يتبدل تركيب  $\delta$  حسب خط التجمد و تركيب السائل حسب خط الانصهار. في النقطة 2 يكون تركيز السائل مطابقاً لتركيز النقطة B وتركيز البلورات  $\delta$  مطابق لتركيز النقطة H ، ويمكننا بواسطة قانون العتلة حساب نسبة كل منهما وفق المعادلة:



الشكل 3-8

مخطط التوازن الحرج للحديد والكربون  
موقع العينات المدروسة



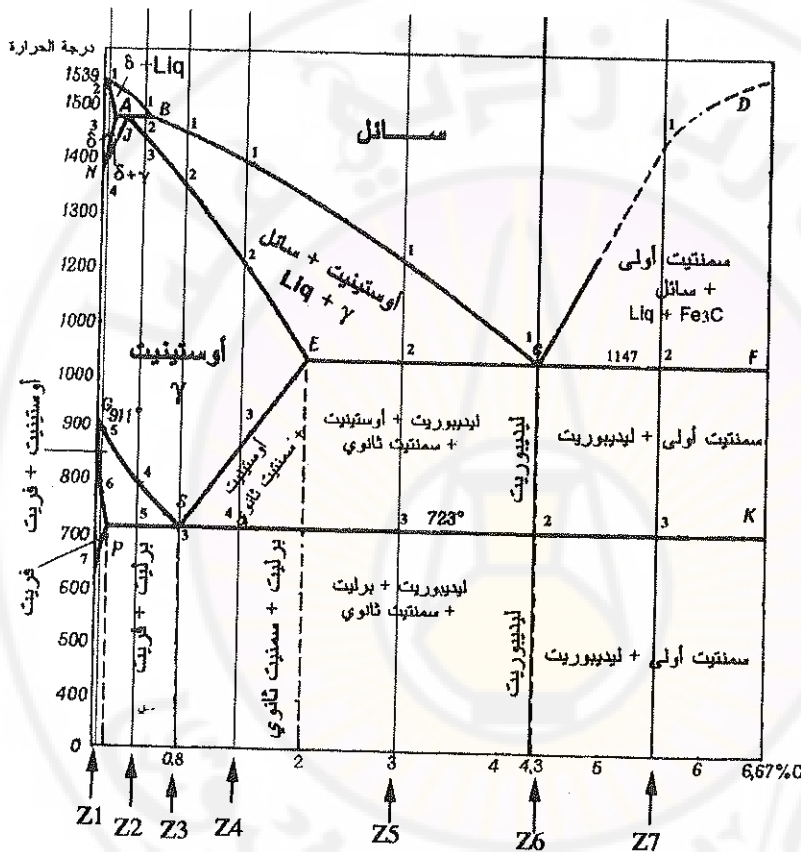
حديد  $\delta$  في النقطة 1 الواقعة على خط الانصهار وينتهي التبلور في النقطة 2 . ويمكن باستخدام قانون العتلة حساب النسب الوزنية للأطوار الموجودة ضمن هذا المجال. ولا يحدث أي تبدل طوري في المجال الواقع بين النقطتين 2 و 3 فقط يتم تبريد حديد  $\delta$  المتشكل مما يؤدي إلى تناقص أبعاد الهياكل الشبكية. تحت النقطة 3 مباشرة تحدث عملية إعادة التبلور حيث يتم تحول حديد  $\delta$  إلى اوستنيت  $\gamma$  ، وبانخفاض درجة الحرارة فإن عملية التحول تستمر وتزداد كمية الاوستنيت. تنتهي في النقطة 4 عملية التحول ويكون قد تشكل اوستنيت متجانس قليل الكربون. في المجال الحراري بين النقطتين 4 و 5 يتم تبريد الاوستنيت و يترافق مع ذلك تقلص في أبعاد الهياكل الشبكية. إن التغير الطوري المهم يحدث تماماً تحت النقطة 5 حيث يتحول الاوستنيت إلى فريت. وتتألف الخليطة في المجال الحراري بين النقطتين 5 و 6 من طورين هما الاوستنيت  $\gamma$  والفريت  $\alpha$  .

وتصبح البنية تحت النقطة 6 عبارة عن فريت متجانس وباستمرار التبريد تتغير قابلية انحلال الكربون في الفريت. ويكون الفريت عند النقطة 7 مشبعاً بالكربون لذلك عند استمرار التبريد فإنه يتشكل من الكربون الفائض ما يسمى بالسمنتيت الثالثي، وبذلك تكون البنية النهائية لهذه الخليطة عند درجات الحرارة العادية عبارة عن فريت وسمنتيت ثالثي ويوضح الشكل 8-4 البنية المجهرية لعينة نسبة الكربون فيها 0.01 % ومنحني تبريدها ( الأرقام على منحني التبريد توافق الأرقام على محور الخليطة في الشكل 8-3 ).

الخليطة  $Z_2$  :

تقع هذه الخليطة في المجال الهيبويوتكتويدي ونسبة الكربون فيها ما بين 0.02 % - 0.85 % . وتكون الخليطة في درجات الحرارة التي أعلى من النقطة 1 عبارة عن سائل منصهر متجانس ( الشكل 8-5 والشكل 8-3 ).

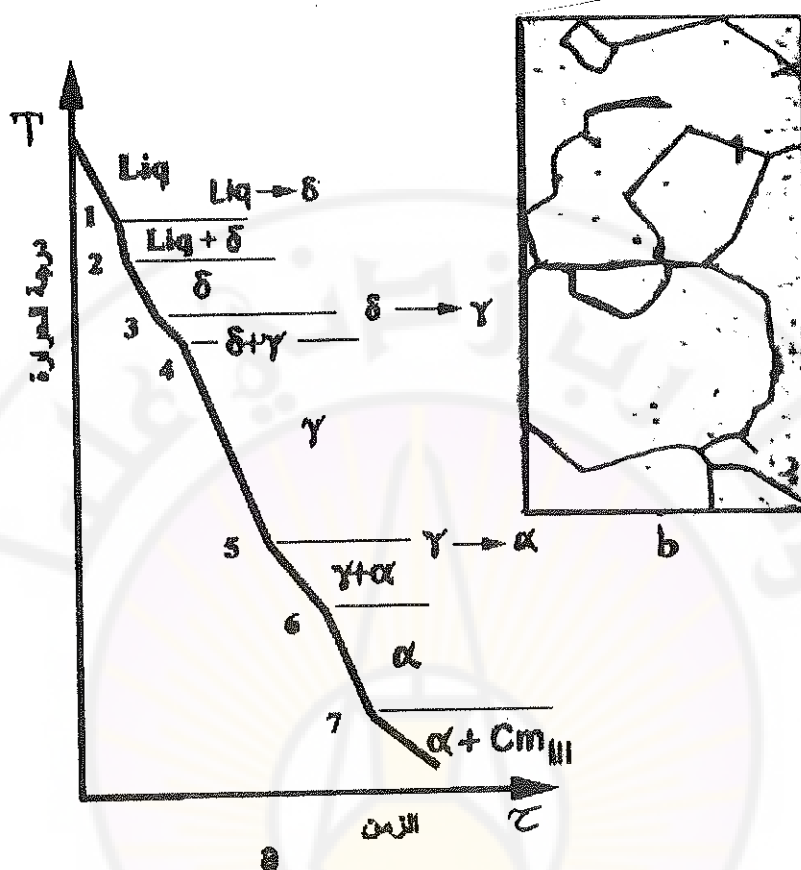
يبدأ تماماً تحت النقطة 1 انفصال بلورات  $\delta$  . يتبدل تركيب  $\delta$  حسب خط التجمد و تركيب السائل حسب خط الانصهار. في النقطة 2 يكون تركيز السائل مطابقاً لتركيز النقطة B وتركيز البلورات  $\delta$  مطابق لتركيز النقطة H ، ويمكننا بواسطة قانون العتلة حساب نسبة كل منهما وفق المعادلة:



الشكل 3-8

مخطط التوازن الحرج للحديد والكربون

موقع العينات المدروسة



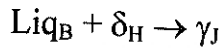
الشكل 4-8

a. منحنى تبريد العينة  $Z_1$

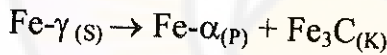
b. البنية المجهرية للعينة  $Z_1$

$$\frac{Liq_B}{\delta_H} = \frac{H_2}{B_2}$$

يحدث في النقطة 2 التفاعل البريتكتيكي وفق المعادلة:



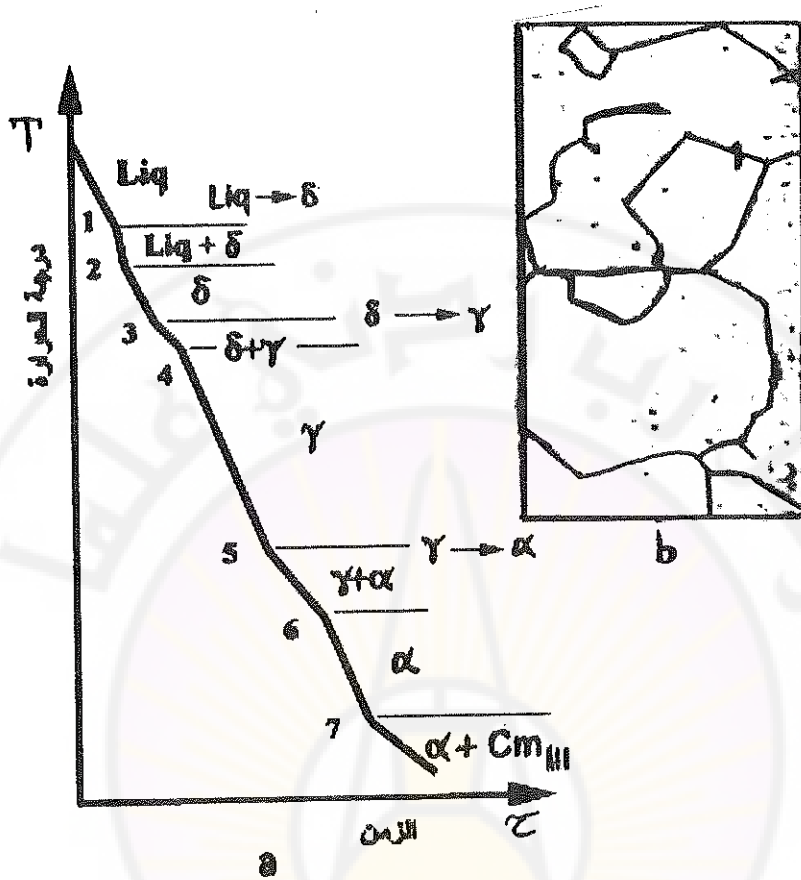
إذن يتفاعل جزء من السائل المنصهر مع بلورات  $\delta$  وينشأ عن ذلك المحلول الصلب  $\gamma$  (الأوستنيت) بتركيز النقطة J. يتبلور الأوستنيت أيضاً ضمن المجال الحراري بين النقطتين 2 و 3 مباشرة من السائل المنصهر. وفي النقطة 3 يكون قد تبلور كامل السائل متشكلاً الأوستنيت المتجانس بتركيز الخليطة  $Z_2$ . يتم تبريد الأوستنيت ضمن المجال الحراري الواقع بين النقطتين 3 و 4 دون حدوث أي تحول، حيث يبدأ عند النقطة 4 تحول الأوستنيت بانفصال بلورات الفريت منه وينتهي هذا الانفصال في النقطة 5 وبنفس الوقت فإن تركيز الأوستنيت يتغير حسب المنحني GS وتركيز الفريت حسب المنحني GP. يصبح تركيز الأوستنيت عند النقطة 5 مساوياً لتركيز اليوتكتويد لذلك يحدث ثبات حراري لفترة زمنية 5 - 5 يتم فيها التحول اليوتكتويدي ويتشكل البريت وفق المعادلة:



وتكون البنية تحت النقطة 5 مكونة من الفريت والبرليت ويمكننا حساب نسبة كل منهما حسب قانون العتلة:

$$\frac{Fer.}{Pear.} = \frac{S_5}{P_5}$$

يوضح الشكل 8-5 منحنى التبريد لعينة هيبيوتكتويدية نسبة الكربون فيها 0.3 % وكذلك البنية المجهرية لهذه العينة وبنيتها التخطيطية.



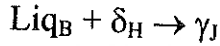
الشكل 4-8

a. منحنى تبريد العينة  $Z_1$

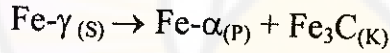
b. البنية المجهرية للعينة  $Z_1$

$$\frac{Liq_B}{\delta_H} = \frac{H_2}{B_2}$$

يحدث في النقطة 2 التفاعل البريتكتيكي وفق المعادلة:



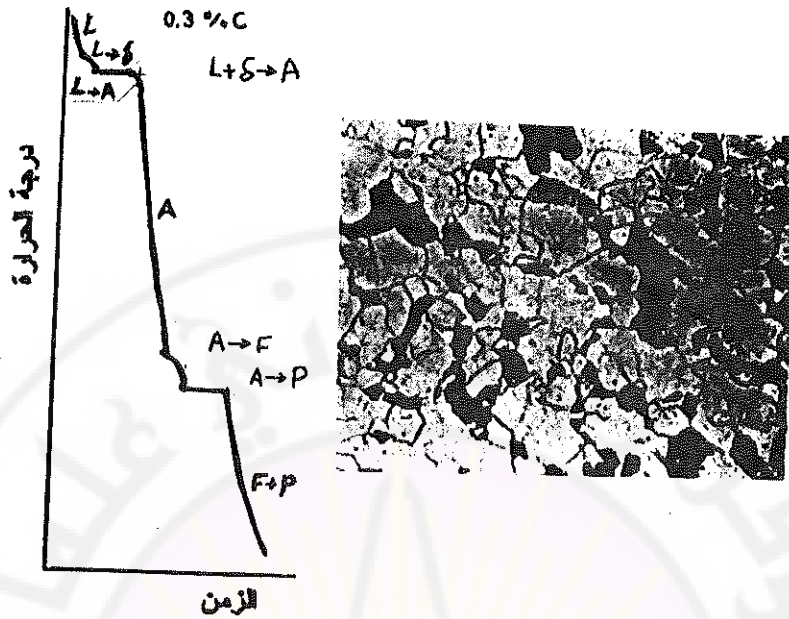
إذن يتفاعل جزء من السائل المنصهر مع بلورات  $\delta$  وينشأ عن ذلك المحلول الصلب  $\gamma$  (الأوستنيت) بتركيز النقطة J. يتبلور الأوستنيت أيضاً ضمن المجال الحراري بين النقطتين 2 و 3 مباشرة من السائل المنصهر. وفي النقطة 3 يكون قد تبلور كامل السائل متشكلاً الأوستنيت المتجانس بتركيز الخليطة  $Z_2$ . يتم تبريد الأوستنيت ضمن المجال الحراري الواقع بين النقطتين 3 و 4 دون حدوث أي تحول، حيث يبدأ عند النقطة 4 تحول الأوستنيت بانفصال بلورات الفريت منه وينتهي هذا الانفصال في النقطة 5 وبنفس الوقت فإن تركيز الأوستنيت يتغير حسب المنحني GS وتركيز الفريت حسب المنحني GP. يصبح تركيز الأوستنيت عند النقطة 5 مساوياً لتركيز اليونكتويد لذلك يحدث ثبات حراري لفترة زمنية 5 - 5 يتم فيها التحول اليونكتويدي ويتشكل البريت وفق المعادلة:



وتكون البنية تحت النقطة 5 مكونة من الفريت والبرليت ويمكننا حساب نسبة كل منهما حسب قانون العتلة:

$$\frac{Fer.}{Pear.} = \frac{S_5}{P_5}$$

يوضح الشكل 8-5 منحنى التبريد لعينة هيبيونكتويدية نسبة الكربون فيها 0.3 % وكذلك البنية المجهرية لهذه العينة وبنيتها التخطيطية.



الشكل 5-8

منحني تبريد عينة 0.3 % كربون وبنيتها المجهرية

### الخليطة $Z_3$ :

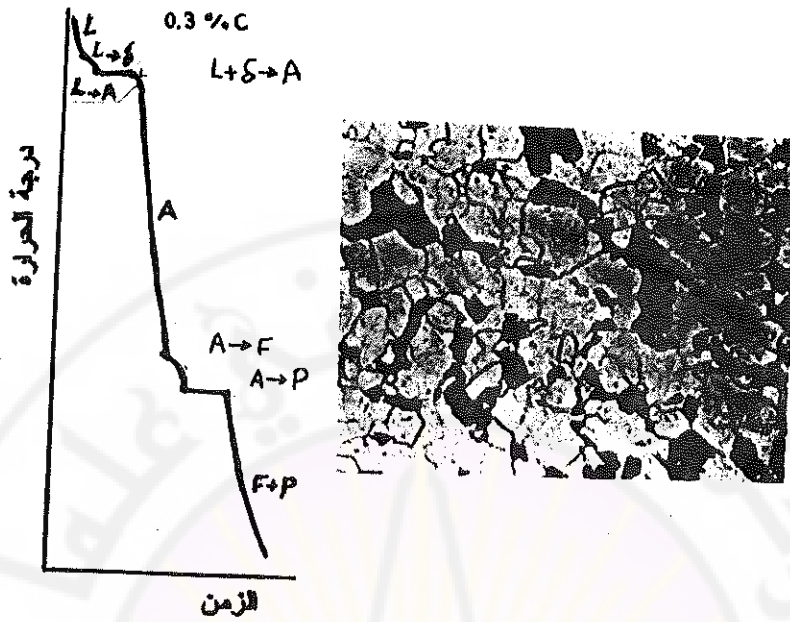
تمثل هذه الخليطة التحول اليوتكتويدي حيث نسبة الكربون فيها 0.85% (توجد في مصادر أخرى عند النسبة 0.8 % ) ويوضح الشكل 6-8 منحني تبريد هذه العينة والبنية المجهرية لها. يتم في المجال الحراري بين 1 و 2 انفصال الاوستنيت  $\gamma$  من السائل المنصهر وتكون نسبة الكربون فيها أقل مما هي في الخليطة  $Z_3$  ، ولكن خلال عملية التبلور ونتيجة لإمكانية الانتشار فإن تزايد نسبة الكربون في البلورات المتشكلة وعندما يتم التبريد حتى النقطة 2

يكون قد انتهى التبلور وأصبح تركيز الاوستنيت موافقاً لنفس تركيز الخليطة. يحدث في النقطة 3 ثبات حراري ويتحول خلاله الاوستنيت إلى برليت. وكما هو معروف فإن البرليت مكون من صفائح متعاقبة من الفريت والسمنتيت ويسمى هذا بالبرليت الصفائحي. عندما يكون الاوستنيت غير متجانس أو عند عمليات التطرية التي تجرى على الفولاذ فإن بنية البرليت المتشكلة تصبح حبيبية وليست صفائحية.

#### الخليطة $Z_4$ :

تقع هذه الخليطة في المجال الهيبريوتكتويدي ونسبة الكربون فيها 0.85 % - 2.06 % . يبدأ التبلور على الخط BC في النقطة 1 ويتشكل الاوستنيت باستمرار التبريد حتى ينتهي عند النقطة 2 ( الشكل 7-8 ). يتم تبريد الاوستنيت في المجال الحراري 2 و 3 حتى يصبح مشبعاً بالكربون عند النقطة 3 وتبدأ قابلية الاوستنيت لانهلال الكربون بالانخفاض عند درجات الحرارة الأصغر. لذلك مع التبريد يبدأ الكربون بالانفصال على شكل سمنتيت ثانوي وبالتالي يتبدل تركيب الاوستنيت حسب المنحني ES. عند درجة الحرارة الموافقة للنقطة 4 يصبح تركيب الاوستنيت مساوياً لتركيز النقطة S ويتم عند ذلك التحول اليوتكتويدي أي يتحول الاوستنيت المتبقي إلى برليت. وتكون البنية النهائية عبارة عن برليت وسمنتيت ثانوي. ويبين الشكل 7-8 منحنى تبريد عينة نسبة الكربون فيها 1.5 % وبنيتها المجهرية.





الشكل 5-8

منحني تبريد عينة 0.3 % كربون وبنيتها المجهرية

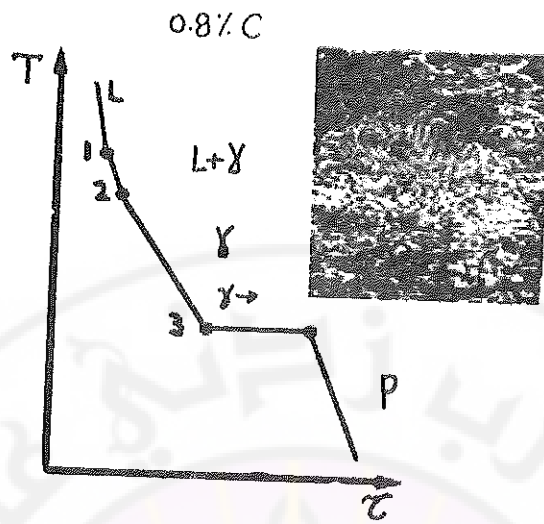
#### الخليطة $Z_3$ :

تمثل هذه الخليطة التحول اليوتكتويدي حيث نسبة الكربون فيها 0.85% (توجد في مصادر أخرى عند النسبة 0.8 % ) ويوضح الشكل 6-8 منحنى تبريد هذه العينة والبنية المجهرية لها. يتم في المجال الحراري بين 1 و 2 انفصال الاوستنيت  $\gamma$  من السائل المنصهر وتكون نسبة الكربون فيها أقل مما هي في الخليطة  $Z_3$  ، ولكن خلال عملية التبلور ونتيجة لإمكانية الانتشار فإن تزايد نسبة الكربون في البلورات المتشكلة وعندما يتم التبريد حتى النقطة 2

يكون قد انتهى التبلور وأصبح تركيز الأوستنيت موافقاً لنفس تركيز الخليطة. يحدث في النقطة 3 ثبات حراري ويتحول خلاله الأوستنيت إلى برليت. وكما هو معروف فإن البرليت مكون من صفائح متعاقبة من الفريت والسمنتيت ويسمى هذا بالبرليت الصفائحي. عندما يكون الأوستنيت غير متجانس أو عند عمليات التطرية التي تجرى على الفولاذ فإن بنية البرليت المتشكلة تصبح حبيبية وليست صفائحية.

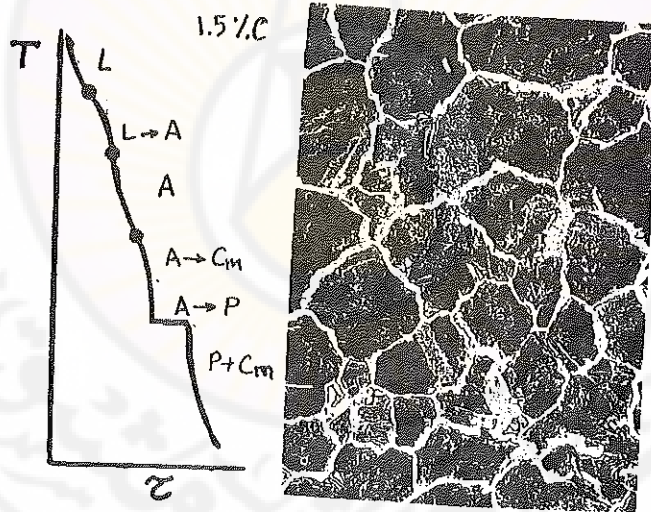
#### الخليطة $Z_4$ :

تقع هذه الخليطة في المجال الهيبريوتكتويدي ونسبة الكربون فيها 0.85 % - 2.06 % . يبدأ التبلور على الخط BC في النقطة 1 ويتشكل الأوستنيت باستمرار التبريد حتى ينتهي عند النقطة 2 ( الشكل 7-8 ). يتم تبريد الأوستنيت في المجال الحراري 2 و 3 حتى يصبح مشبعاً بالكربون عند النقطة 3 وتبدأ قابلية الأوستنيت لانهلال الكربون بالانخفاض عند درجات الحرارة الأصغر. لذلك مع التبريد يبدأ الكربون بالانفصال على شكل سمنتيت ثانوي وبالتالي يتبدل تركيب الأوستنيت حسب المنحني ES. عند درجة الحرارة الموافقة للنقطة 4 يصبح تركيب الأوستنيت مساوياً لتركيز النقطة S ويتم عند ذلك التحول اليوتكتويدي أي يتحول الأوستنيت المتبقي إلى برليت. وتكون البنية النهائية عبارة عن برليت وسمنتيت ثانوي. ويبين الشكل 7-8 منحنى تبريد عينة نسبة الكربون فيها 1.5 % وبنيتها المجهرية.



الشكل 6-8

منحني تبريد العينة  $Z_3$  وبنيتها المجهرية



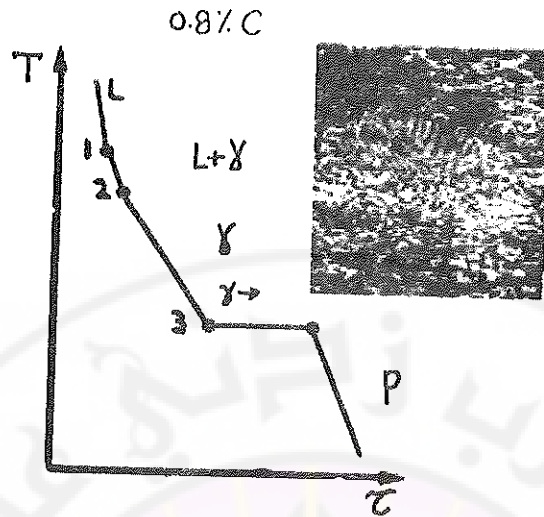
الشكل 7-8

منحني تبريد العينة  $Z_4$  وبنيتها المجهرية

### الخليطة Z<sub>5</sub> :

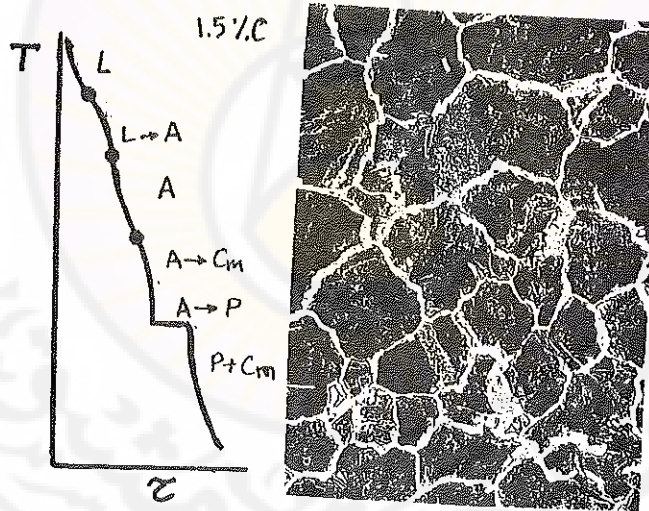
هي خليطة هيبيوتكتيكية نسبة الكربون فيها بين 2.06 % - 4.3 % وهي عبارة عن حديد صب أبيض. يبدأ التبلور على منحنى الانصهار BC في النقطة 1 وتتشكل بلورات الاوستنيت ( الشكل 8-8 ). تزداد بانخفاض درجات الحرارة كمية الاوستنيت المتشكلة وبنفس الوقت يتغير تركيبه حسب المنحنى JE ( الشكل 8-3 ) ويتغير تركيز المعدن المنصهر حسب المنحنى BC . وعند الوصول إلى درجة حرارة اليوتكتيك ( 1147 °C ) يصبح تركيز المعدن المنصهر موافقاً لتركيز النقطة C ( أي 4.3 % كربون ) والاوستنيت بتركيز النقطة E ( أي 2.06 % كربون ) لذلك يتم التحول اليوتكتيكي ويتبلور المعدن المنصهر بشكل لديبورييت. باستمرار التبريد ونتيجة لتغير قابلية الاوستنيت لانحلال الكربون ينفصل السمنتيت الثانوي وذلك ضمن المجال الحراري بين 2 و 3 وعندما تصبح درجة الحرارة 723 درجة مئوية ( درجة حرارة التحول اليوتكتويدي ) يصبح تركيز الاوستنيت مطابقاً لتركيز النقطة S ويحدث التحول اليوتكتويدي، لذلك تكون عناصر البنية المتشكلة عبارة عن البرليت والسمنتيت الثانوي والديبورييت. ويبين الشكل 8-8 منحنى تبريد عينة نسبة الكربون فيها 3.0 % وبنيتها المجهرية.

تبين الأشكال 8-9 و 8-10 منحنيات تبريد العينات Z<sub>6</sub> , Z<sub>7</sub> حيث يتم دراسة تحولاتها بشكل مشابه للعينات السابقة.



الشكل 6-8

منحني تبريد العينة  $Z_3$  وبنيتها المجهرية



الشكل 7-8

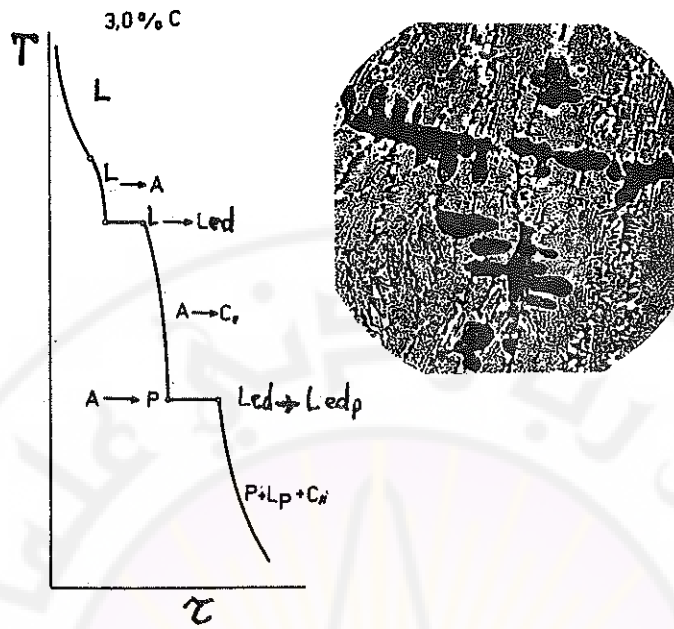
منحني تبريد العينة  $Z_4$  وبنيتها المجهرية

### الخليطة $Z_5$ :

هي خليطة هيبيوونكتيكية نسبة الكربون فيها بين 2.06 % - 4.3 % وهي عبارة عن حديد صب أبيض. يبدأ التبلور على منحنى الانصهار BC في النقطة 1 وتتشكل بلورات الأوستنيت ( الشكل 8-8 ). تزداد بانخفاض درجات الحرارة كمية الأوستنيت المتشكلة وبنفس الوقت يتغير تركيبه حسب المنحنى JE ( الشكل 8-3 ) ويتغير تركيز المعدن المنصهر حسب المنحنى BC . وعند الوصول إلى درجة حرارة اليوتكتيك (  $1147^{\circ}\text{C}$  ) يصبح تركيز المعدن المنصهر موافقاً لتركيز النقطة C ( أي 4.3 % كربون ) والأوستنيت بتركيز النقطة E ( أي 2.06 % كربون ) لذلك يتم التحول اليوتكتيكي ويتبلور المعدن المنصهر بشكل لديبورييت. باستمرار التبريد ونتيجة لتغير قابلية الأوستنيت لاندخال الكربون يفصل السمنتيت الثانوي وذلك ضمن المجال الحراري بين 2 و 3 وعندما تصبح درجة الحرارة 723 درجة مئوية ( درجة حرارة التحول اليوتكتويدي ) يصبح تركيز الأوستنيت مطابقاً لتركيز النقطة S ويحدث التحول اليوتكتويدي، لذلك تكون عناصر البنية المتشكلة عبارة عن البرليت والسمنتيت الثانوي والديبورييت. ويبين الشكل 8-8 منحنى تبريد عينة نسبة الكربون فيها 3.0 % وبنيتها المجهرية.

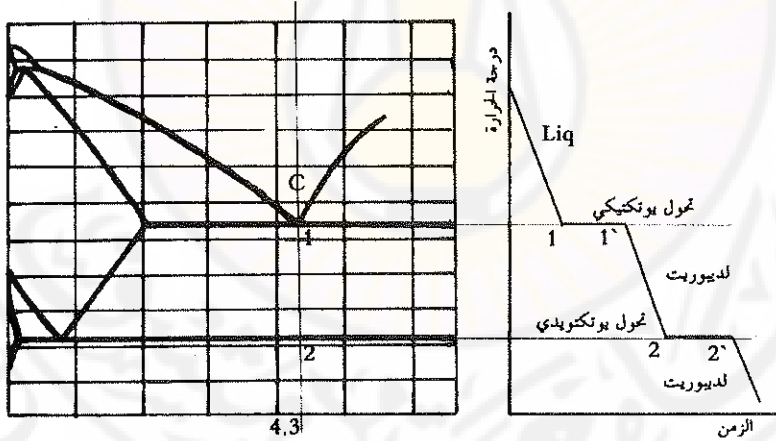
تبين الأشكال 8-9 و 8-10 منحنيات تبريد العينات  $Z_6$  ,  $Z_7$  حيث يتم دراسة تحولاتها بشكل مشابه للعينات السابقة.





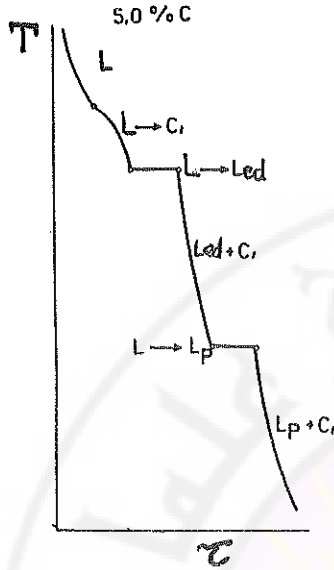
الشكل 8-8

منحني تبريد العينة  $Z_5$  وبنيتها المجهرية



الشكل 9-8

منحني تبريد العينة  $Z_6$



الشكل 8-10

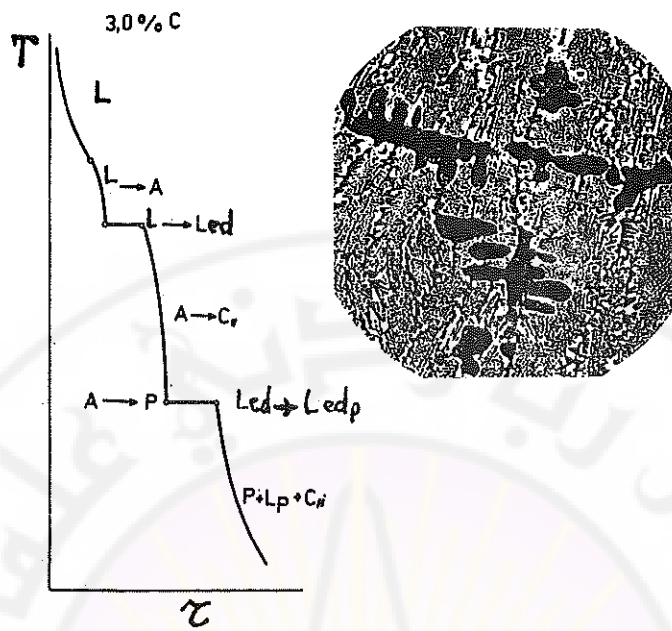
منحني تبريد العينة Z<sub>7</sub> وبنيتها المجهرية

### 8 - 1 - 2 مخطط توازن الحديد والكربون التام :

يتكون الغرافيت الأولي تحت ظروف التوازن التام عند درجات الحرارة المناظرة للخط C'D' ( الشكل 8-11 ). وعند درجة حرارة 1153 درجة مئوية (الخط E'C'F') يتكون يونكتيك غرافيتي المؤلف من الاوستنيت والغرافيت. وينفصل الغرافيت الثانوي على طول الخط S'E' ، وعند الدرجة 738 درجة مئوية ( الخط P'S'K' ) يتكون البيوكتويد المؤلف من الفريت والغرافيت.

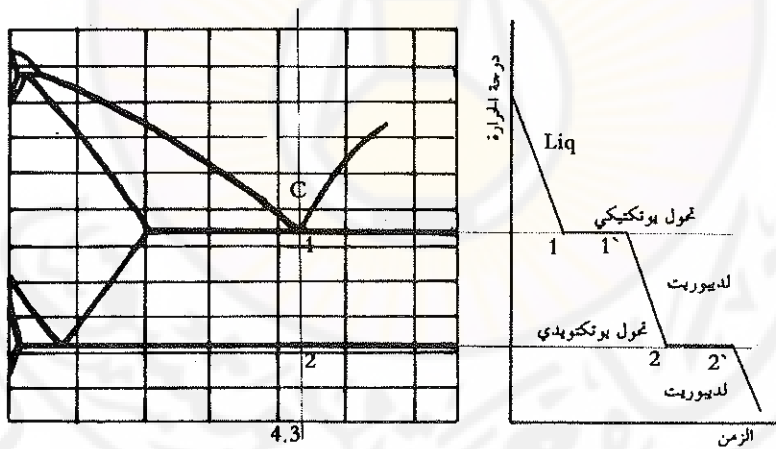
يتكون الغرافيت فقط عند استخدام سرعات تبريد بطيئة للغاية ويؤدي تزايد سرعات التبريد إلى عرقلة جزئية أو كلية لتكون الغرافيت. ولتوضيح





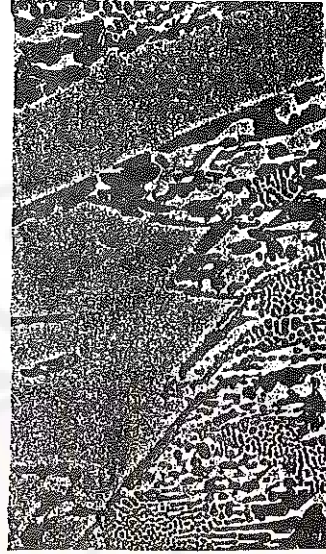
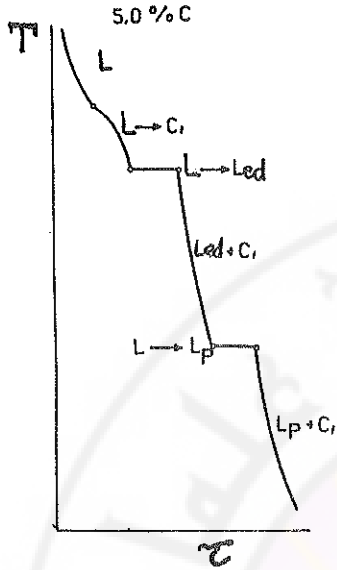
الشكل 8-8

منحني تبريد العينة  $Z_5$  وبنيتها المجهرية



الشكل 9-8

منحني تبريد العينة  $Z_6$



الشكل 8-10

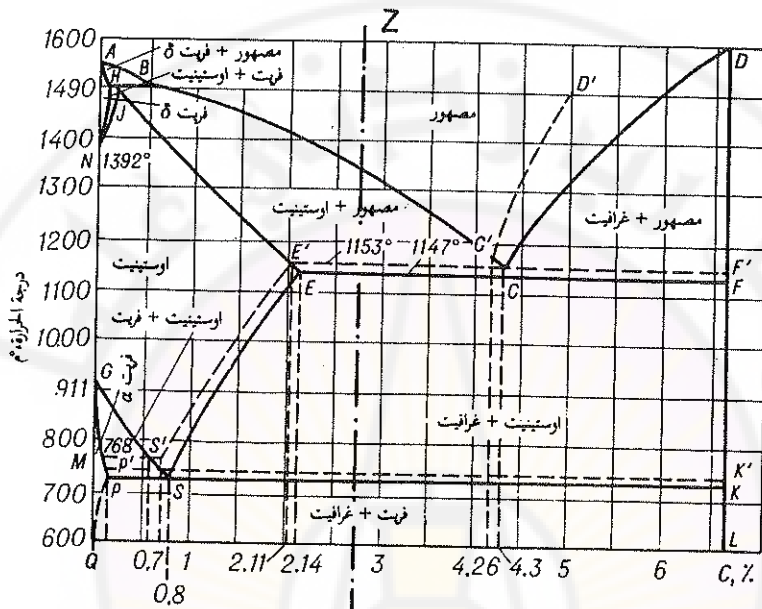
منحني تبريد العينة Z<sub>7</sub> وبنيتها المجهرية

### 8-1-2 مخطط توازن الحديد والكربون التام :

يتكون الغرافيت الأولي تحت ظروف التوازن التام عند درجات الحرارة المناظرة للخط C'D' ( الشكل 8-11 ). وعند درجة حرارة 1153 درجة مئوية (الخط E'C'F' ) يتكون يوتكتيك غرافيتي المؤلف من الاوستنيت والغرافيت. وينفصل الغرافيت الثانوي على طول الخط S'E' ، وعند الدرجة 738 درجة مئوية ( الخط P'S'K' ) يتكون اليوتكتويد المؤلف من الفريت والغرافيت.

يتكون الغرافيت فقط عند استخدام سرعات تبريد بطيئة للغاية ويؤدي تزايد سرعات التبريد إلى عرقلة جزئية أو كلية لتكون الغرافيت. ولتوضيح

أهمية شروط التبريد ندرس العينة Z الواقعة في مجال الهيبويوتكتيك وذلك بتبريدها بسرعات تبريد مختلفة بحيث تكون سرعات التبريد  $v_1 < v_2 < v_3 < v_4 < v_5$ .



الشكل 8-11

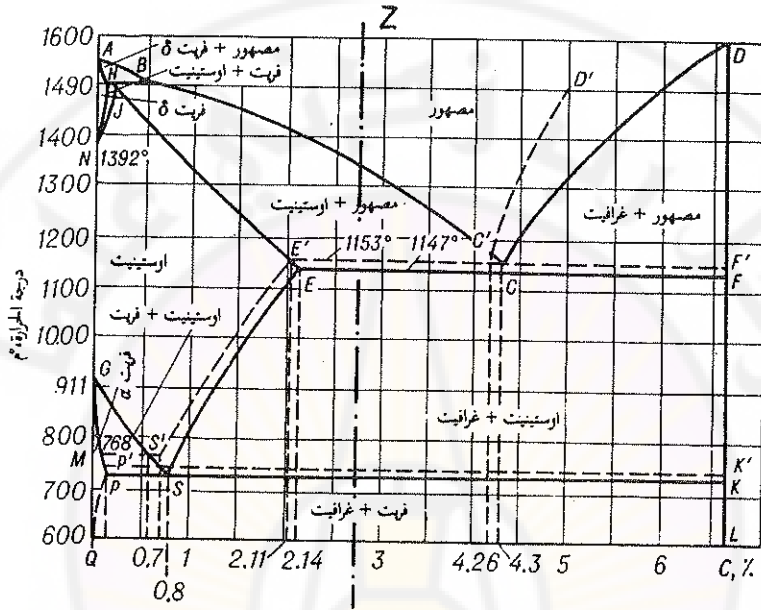
1. تبريد الخليطة Z عند سرعة تبريد  $v_1$  (سرعة بطيئة جداً):  
 في درجات الحرارة التي أعلى من النقطة 1 تكون الخليطة بشكل سائل متجانس وتبدأ تحت هذه النقطة بلورات الأوستنيت بالانفصال. يتبدل تركيب المصهور حسب المنحني  $1C'$  وعندما تصبح درجة الحرارة عند النقطة 2 يكون السائل بتركيز النقطة  $C'$  والأوستنيت بتركيز النقطة  $E'$ . وتكون هنا عملية

التسبلور  $L_c \rightarrow Fe\gamma(E) + G$  وينتهي التسبلور وتكون البنية صلبة مكونة من الاوستنيت والغرافيت اليونكتيكي. وبمتابعة التبريد البطيء تحدث تبدلات البنية بشكل متوازن ويفصل ضمن المجال الحراري بين 738 - 1153 درجة مئوية الغرافيت الثانوي من الاوستنيت. عند درجة الحرارة 738 يكون قد أصبح تركيز الاوستنيت مطابقاً لتركيز النقطة  $S'$  ويبدأ بالتحول إلى فريت وغرافيت (يونكتويد) وبذلك تنتهي عملية التحول وتصبح البنية مكونة من الفريت وعروق الغرافيت ويتشكل حديد صلب رمادي فريتي. ويبين الشكل 8-12 منحنى تبريد هذه الخليطة عند سرعة تبريد  $v_1$ .

## 2. تبريد الخليطة Z عند سرعة تبريد $v_2$ :

سوف تكون عمليات التحول للخليطة حتى درجة الحرارة 738 درجة مئوية لما حدث عند سرعة التبريد  $v_1$ . ولكن بما أن سرعة التبريد أكبر من الحالة السابقة فلذلك وعند درجة الحرارة 738 يتم تحول جزء من الاوستنيت حسب مخطط التوازن التام والجزء الثاني سيتم تحوله عند درجة حرارة 723 درجة مئوية حسب مخطط التوازن الحرج أي يتحول هذا الجزء من الاوستنيت إلى برليت. بذلك تنتهي عمليات التحول وتصبح البنية مكونة من الفريت والبرليت وعروق من الغرافيت. يطلق على هذه البنية أسم الحديد الصلب الرمادي فريتي - برلتي. ويبين الشكل 8-13 منحنى تبريد هذه الخليطة عند سرعة تبريد  $v_2$ .

أهمية شروط التبريد ندرس العينة Z الواقعة في مجال الهيبويوتكتيك وذلك بتبريدها بسرعات تبريد مختلفة بحيث تكون سرعات التبريد  $v_1 < v_2 < v_3 < v_4 < v_5$



الشكل 8-11

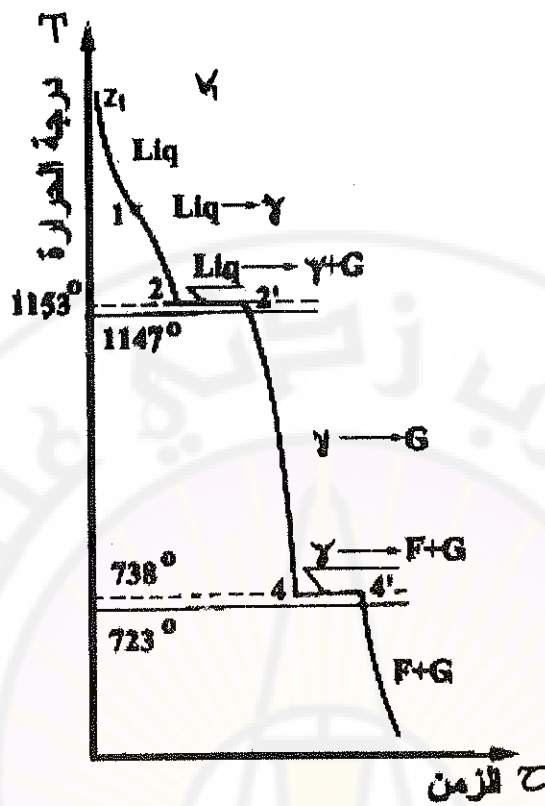
مخطط التوازن التام

1. تبريد الخليطة Z عند سرعة تبريد  $v_1$  (سرعة بطيئة جداً):  
في درجات الحرارة التي أعلى من النقطة 1 تكون الخليطة بشكل سائل متجانس وتبدأ تحت هذه النقطة بلورات الأوستنيت بالانفصال. يتبدل تركيب المصهور حسب المنحني 1C' وعندما تصبح درجة الحرارة عند النقطة 2 يكون السائل بتركيز النقطة C' والأوستنيت بتركيز النقطة E'. وتكون هنا عملية

التبلور  $L_c \rightarrow Fe\gamma_{(E)} + G$  وينتهي التبلور وتكون البنية صلبة مكونة من الأوستنيت والغرافيت اليوتكتيكي. وبمتابعة التبريد البطيء تحدث تبدلات البنية بشكل متوازن ويفصل ضمن المجال الحراري بين 738 - 1153 درجة مئوية الغرافيت الثانوي من الأوستنيت. عند درجة الحرارة 738 يكون قد أصبح تركيز الأوستنيت مطابقاً لتركيز النقطة  $S'$  ويبدأ بالتحول إلى فريت وغرافيت (يوتكتويد) وبذلك تنتهي عملية التحول وتصبح البنية مكونة من الفريت وعروق الغرافيت ويتشكل حديد صب رمادي فريتي. ويبين الشكل 8-12 منحنى تبريد هذه الخليطة عند سرعة تبريد  $V_1$ .

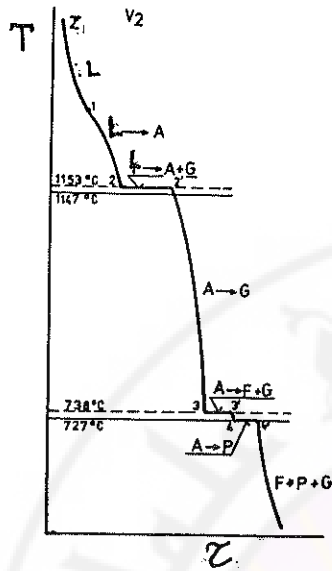
## 2. تبريد الخليطة Z عند سرعة تبريد $v_2$ :

سوف تكون عمليات التحول للخليطة حتى درجة الحرارة 738 درجة مئوية لما حدث عند سرعة التبريد  $V_1$ . ولكن بما أن سرعة التبريد أكبر من الحالة السابقة فلذلك وعند درجة الحرارة 738 يتم تحول جزء من الأوستنيت حسب مخطط التوازن التام والجزء الثاني سيتم تحوله عند درجة حرارة 723 درجة مئوية حسب مخطط التوازن الحرج أي يتحول هذا الجزء من الأوستنيت إلى برليت. بذلك تنتهي عمليات التحول وتصبح البنية مكونة من الفريت والبرليت وعروق من الغرافيت. يطلق على هذه البنية أسم الحديد الصب الرمادي فريتي - برلتي. ويبين الشكل 8-13 منحنى تبريد هذه الخليطة عند سرعة تبريد  $V_2$ .



الشكل 8-12

منحني تبريد الخليطة Z عند سرعة تبريد  $v_1$



البنية المجهرية

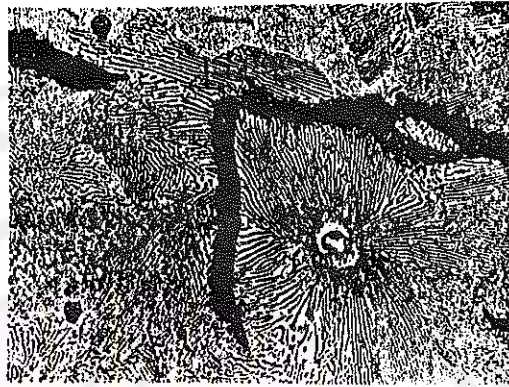
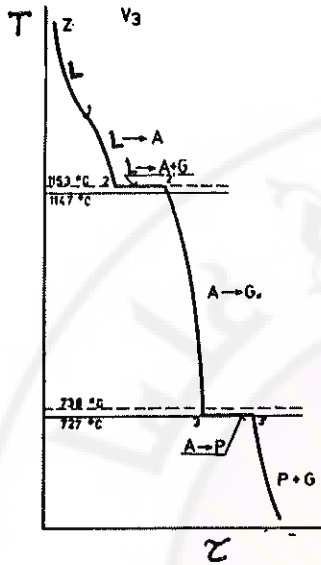
الشكل 8-13

منحني تبريد الخليطة Z بسرعة  $v_2$

3. تبريد الخليطة Z عند سرعة تبريد  $v_3$  :

إن عمليات التحول حتى درجة الحرارة 738 ستكون مثل سابقتها، ولكن بعد ذلك ونتيجة لزيادة سرعة التبريد فإن التحول في المجال اليونكتويدي لن يتم حسب مخطط التوازن التام ولكن حسب مخطط التوازن الحرج أي عند درجة حرارة 723 ويكون تركيز الاوستنيت مطابقاً لتركيز النقطة S وبالتالي سوف يتحول إلى برليت. تكون بذلك بنية الحديد مكونة من البرليت وضمنها عروق من الغرافيت ويسمى بالحديد الصب الرمادي البرليني. ويبين الشكل 8-14 منحنى التبريد عند سرعة  $v_3$  .





البنية المجهرية

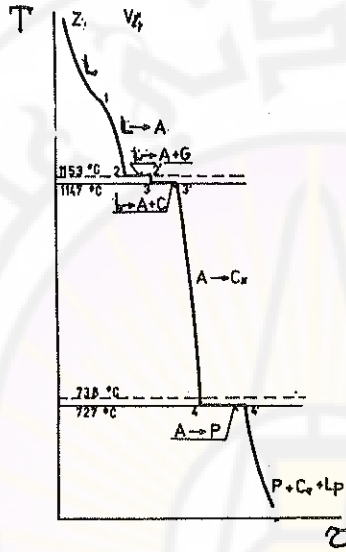
الشكل 8-14

منحني تبريد الخليطة Z بسرعة  $V_3$

#### 4. تبريد الخليطة Z عند سرعة تبريد $V_4$ :

نتيجة لزيادة سرعة التبريد يحدث في منطقة التحول اليوتكتيكي تحول على مرحلتين: الأولى يتم التحول حسب مخطط التوازن التام ويتحول قسم من السائل إلى غرافيت واوستنيت. في المرحلة الثانية يتحول القسم الآخر من السائل حسب مخطط التوازن الحرج ويتشكل اللديبوريت. بعد انتهاء التبلور فإن التحولات التالية الناتجة عن تبريد الخليطة ستحدث بالشكل الأقل توازناً أي حسب المخطط الحرج ويحدث انفصال السمنتيت الثانوي من الاوستنيت، وفي

مجال التحول اليونكتويدي يتحول الباقي من الاوستنيت إلى برليت. وبذلك تكون البنية النهائية لهذه الحالة عبارة عن برليت ولديبوريت وسمنتيت ثانوي وغرافيت. إذن تكون هذه الخليطة مشتركة بين الحديد الصلب الرمادي والحديد الصلب الأبيض. ويبين الشكل 8-15 منحنى تبريد هذه العينة.



الشكل 8-15

منحنى تبريد الخليطة Z عند سرعة تبريد  $v_4$

5. تبريد الخليطة Z عند سرعة تبريد  $v_5$  :

إذا زادت سرعة التبريد عن  $v_4$  فإن التبلور والتحويلات التي تليه تتم حسب مخطط التوازن الحرج وتكون البنية عبارة عن اللديبوريت والبرليت والسمنتيت الثانوي أي حديد صلب أبيض.

## 8-2 المعالجة الحرارية للفولاذ والحديد الصلب:

### 8-2-1 أسس المعالجة الحرارية:

تعتبر المعالجة الحرارية مجموعة عمليات تسخين المعادن في الحالة الصلبة، وإبقائها عند درجة حرارة ثابتة، ثم تبريدها بغرض تغيير بنيتها وإعطائها الخواص الطبيعية والميكانيكية المطلوبة. وتعالج الأجزاء نصف المصنعة معالجة حرارية لخفض قساوتها وتحسين قابليتها للتشغيل، ولإعداد البنية للمعالجة الحرارية النهائية، كما تعالج الأجزاء المصنعة والآلات لمنحها الخواص النهائية المطلوبة، ويمكن تغيير خواص الخلطات بواسطة المعالجة الحرارية في حدود واسعة، فعلى سبيل المثال يمكن رفع قساوة الفولاذ الابتدائية من  $HB = 150 \div 200$  بواسطة التقسية إلى  $HB = 600 \div 650$  كما يمكن بواسطة المعالجة الحرارية المناسبة زيادة مقدار الاستطالة النسبية  $\delta$  ومقاومة الصدم  $a_k$  والمتانة القصوى  $\sigma_b$  إلى حد كبير. وتسمح إمكانية رفع الخواص الميكانيكية للمعادن بشكل ملموس بواسطة المعالجة الحرارية بزيادة الإجهادات المسموح بها وإنقاص أبعاد ووزن الأجزاء مع احتفاظها بمقاومتها ومتانتها والاعتماد عليها في الاستعمال.

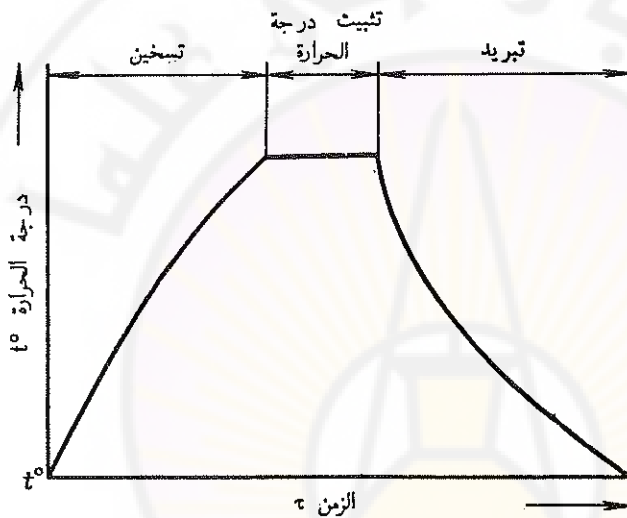
هناك ثلاث عمليات أساسية في المعالجة الحرارية وهي التسخين والإبقاء في درجات الحرارة العالية والتبريد (كما هو مبين في الشكل 8-16):

أ - تسخين بمعدل محدد للوصول إلى درجة حرارة معينة:

ب - الاحتفاظ بالجزء المعالج عند درجة الحرارة المناسبة لفترة زمنية كافية حتى تصل كامل القطعة إلى درجة الحرارة المطلوبة.

ج - التبريد بمعدل محدد، وتعتبر هذه الخطوة من الخطوات الأساسية المحددة بخواص القطعة المعالجة.

وفي المعالجة الحرارية الصناعية الفعلية، يمكن أن تتكرر المراحل الأساسية المذكورة عدة مرات أي يمكن أن تتكون المعالجة من أكثر من دورة.



الشكل 8-16

دورة المعالجة الحرارية

وقد اصطلح عن تسمية النقاط الحرجة للفلاد  $A_{c1}$  — عند التسخين (السفلى)،  $A_{c3}$  (العليا) وعند التبريد  $A_{r1}$  (السفلى) و  $A_{r3}$  (العليا) ( وهذا موضع على الشكل 8-17 ).

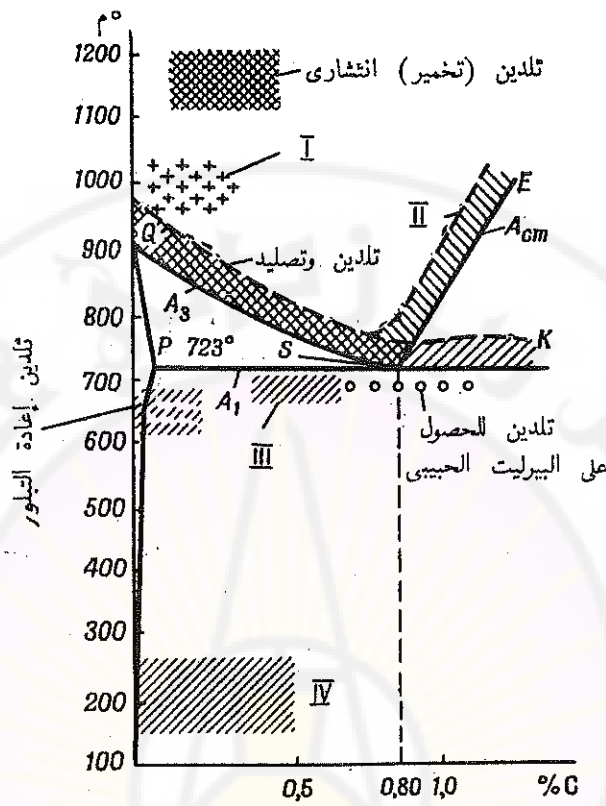
إن درجة الحرارة  $723^{\circ}\text{C}$  ( $A_{c1}$ ) هي درجة حرارة تحول البرليت إلى اوستنيت وبدء تحول الفريت إلى أوستنيت. أما  $A_{c3}$  وهي منطبقة إلى الخط GS من المخطط هي درجة حرارة تحول الفريت إلى أوستنيت، و  $A_{r1}$  هي درجة حرارة تحول الأوستنيت إلى الفريت (وهي أقل من  $723^{\circ}\text{C}$ )،  $A_{r3}$  هي درجة حرارة بدء انفصال الفريت من الأوستنيت،  $A_{cm}$  هي درجة حرارة بدء انفصال السمنتيت الثانوي من الأوستنيت عند التبريد. وهي كذلك درجة انتهاء ذوبان السمنتيت الثانوي في الأوستنيت عند التسخين.

### تحويلات الفولاذ عند التسخين:

تتكون بنية الفولاذ قبل اليوتكتويدي أسفل درجة حرارة التفاعل اليوتكتويدي  $A_{c1}$  من الفريت والبرليت، في حين تتكون البنية اليوتكتويدي من البرليت، وبعد اليوتكتويدي تتكون من البرليت والسمنتيت الثانوي. وهذا يعني أن البنية الابتدائية لأنواع الفولاذ هي عبارة عن خليط من طورين هما الفريت والسمنتيت. وعند عبور النقطة الحرجة  $A_{c1}$  يبدأ التحول الطوري  $\gamma \leftarrow \alpha$  وذوبان السمنتيت في حديد  $\gamma$  مع تكون الأوستنيت. وتتكون بنية الفولاذ قبل اليوتكتويدي في مدى درجات الحرارة من  $A_{c1}$  إلى  $A_{c3}$  من الفريت والاسمنتيت المتغير التركيز، مع ملاحظة حدوث التحول  $\gamma \leftarrow \alpha$  بارتفاع درجة الحرارة. وبالمقابل فإن الأوستنيت الذي يتكون في الفولاذ بعد اليوتكتويدي يتحول البرليت عند درجة الحرارة  $A_{c1}$  يذيب السمنتيت الثانوي مع استمرار التسخين. وتتكون بنية الفولاذ فوق نقطة  $A_{cm}$  من طور واحد هو الأوستنيت. ويذوب كذلك الفريت في الأوستنيت عند ارتفاع درجة الحرارة في الفولاذ قبل اليوتكتويد بعد إتمام تحول البرليت إلى أوستنيت وعند الوصول إلى درجة الحرارة  $A_{c3}$  الموجودة على الخط GS نحصل على بنية وحيدة الطور من الأوستنيت الخالص. أما في الفولاذ بعد اليوتكتويد فإن السمنتيت الثانوي يذوب في الأوستنيت عند ارتفاع

درجات الحرارة، فنحصل عند الوصول إلى درجة  $A_{cm}$  الموجودة على الخط SE على بنية وحيدة الطور من الاوستنيت. وبهذا فإن تسخين أي نوع من أنواع الفولاذ أعلى من الخط GSE يؤدي إلى تحوله إلى حالة الاوستنيت، ويؤدي استمرار التسخين (فوق الخط GSE) إلى نمو حبيبات الاوستنيت.

عادة يصحب تحول البرليت إلى الاوستنيت تكون الاوستنيت الدقيق الحبيبات، وفي درجات الحرارة الأعلى من النقطة الحرجة  $A_{c1}$  تنمو حبيبات الاوستنيت بدرجة تزداد كلما ازدادت درجة حرارة التسخين وأبقائها فيها. ومن المعروف أن نمو حبيبات الاوستنيت يجري في بعض أنواع الفولاذ عند درجة حرارة لا تزيد عن النقطة الحرجة  $A_{c1}$  إلا قليلاً، وتسمى هذه الأنواع كبيرة الحبيبات بالوراثه. وفي الأنواع الأخرى من الفولاذ يحتفظ الفولاذ بحبيبات دقيقة للاوستنيت عند التسخين إلى درجات حرارة عالية. وتسمى هذه الأنواع من أنواع صغيرة الحبيبات بالوراثه. ويقصد بصغر أو كبر الحبيبات الوراثي ميل الحبيبات إلى النمو. ونحصل على الفولاذ الصغر الحبيبات بالوراثه بتعديل الفولاذ بالألومنيوم أو الفناديوم أو التيتانيوم.



الشكل 8-17

درجات الحرارة الحرجة ومناطق المعالجات  
الحرارية على جزء من مخطط الحديد والكربون  
"I, II - مراجعة، III, IV - إرجاع"

## تحويلات الفولاذ عند تبريده:

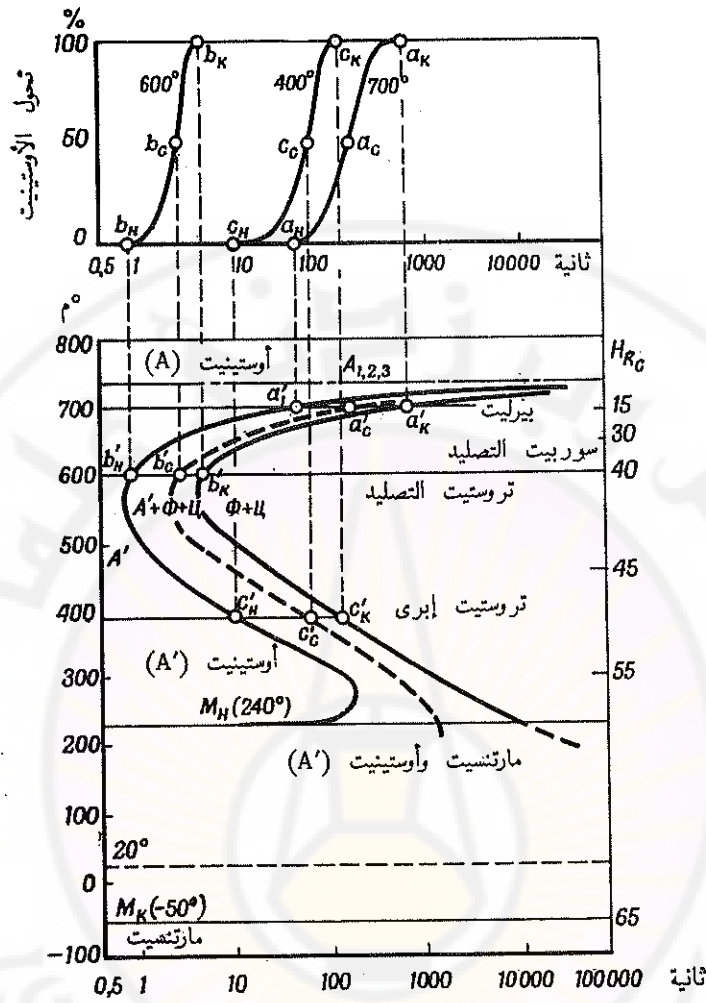
### 1. التحول الأوستنيتي:

يبين الشكل 8-18 المنحنيات البيانية لتحول الأوستنيت عند درجة حرارة ثابتة (التحول الأيزوترمي). وتظهر على الرسم البياني للتحول الأيزوترمي للأوستنيت المناطق التالية: يكون الأوستنيت A فوق درجة الحرارة  $A_1$  ثابتاً. وتوجد بين النقطتين  $A_1$  و  $M_H$  ثلاث مناطق: الأولى على يسار الرسم البياني وهي المنطقة من بداية الإحداثيات حتى منحنى بدء التحول وبها أوستنيت متجاوز التبريد (المنطقة  $A'$ )؛ الثانية المنطقة بين منحنى بداية ونهاية التحول ويكون بها الأوستنيت قد بدأ تحوله وما زال مستمراً (ويرمز لها  $A' + Fr + Cm$ )؛ الثالثة المنطقة على يمين منحنى انتهاء التحول ويكون التحول قد تم كلياً بها ( $Fr + Cm$ ). ويتفق الرسم البياني في أنواع الفولاذ قبل البوتكتويد نظراً لظهور انفصال الفريت من الأوستنيت، وكذلك في أنواع الفولاذ بعد البوتكتويد نتيجة انفصال السمنتيت الثانوي.

### 2. التحول البرليني:

تتكون نتيجة للتحول الأيزوترمي عند درجة حرارة  $710^\circ C$  بنية من البرليت الصفائحي ( $Fr + Cm$ ) قساوته 15HRC. وبإنقاص درجة حرارة التحول الأيزوترمي تصبح صفائح البرليت دقيقة إلى درجة يصعب معها تمييزها تحت المجهر الضوئي وتسمى هذه البنية بالسوربيت وتبلغ قساوته 30HRC. ويكون الأوستنيت مفرط التبريد عند درجة حرارة  $550^\circ C$  برلياً تنتشر به صفائح السمنتيت انتشاراً واسعاً ويسمى مثل هذا البرليت بالتروستيت وتبلغ قساوته 40HRC.





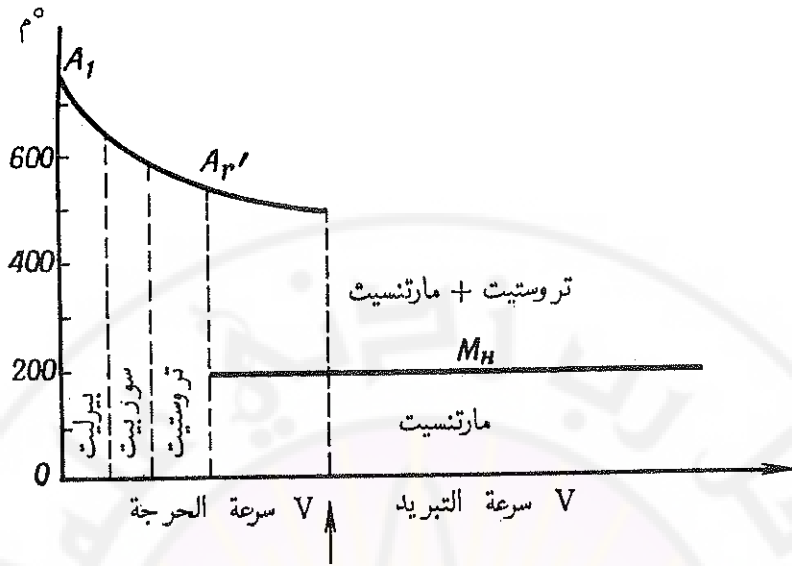
الشكل 8-18

منحنى التحول الايزوترمي للأوستينيت في الفولاذ اليوتكتويدي

### 3. تحول الأوستنيت عند التبريد المستمر:

يمكن عند المعالجة الحرارية للفولاذ الحصول على نفس البنيات النموذجية الناتجة عند التحول الأيزوثيرمي وذلك بتدبيره تبريداً مستمراً مع التحكم في سرعة التبريد، وعلى سبيل المثال فإن النقطة الحرجة  $A_1$  فتتخفض في الفولاذ اليوتكتوئيدي عند تبريده تبريداً مستمراً بسرعة  $1^\circ\text{C}/\text{min}$  إلى  $A'_r$   $710^\circ\text{C}$  ويتكون به برليت كبير الصفائح ويزيادة سرعة التبريد إلى  $1^\circ\text{C}/\text{sec}$  يصبح البرليت المتكون دقيق الصفائح وتزداد قساوته. ولو زادت سرعة التبريد إلى  $50^\circ\text{C}/\text{sec}$  لانخفضت درجة التحول إلى  $A'_r = 600^\circ\text{C}$  ولتحول الأوستنيت إلى تروستيت. وعند سرعات التبريد الأعلى من  $150^\circ\text{C}/\text{sec}$  تصل النقطة الحرجة إلى  $240^\circ\text{C}$  ويبدأ الأوستنيت بالتحول إلى مارتنسيت  $(c)$   $\text{Fe}_\alpha$  دون انتشار. ويبين الشكل 8-19 تأثير سرعة التبريد على انخفاض النقطة الحرجة  $A_1$  في الفولاذ اليوتكتوئيدي. ويمثل المنحني العلوي  $A'_r$  أوستنيتاً مفرط التبريد وتحوله يكون إلى خليط من الفريت والسمنتيت ويزاد سرعة التبريد تزداد درجة فرط التبريد ويمثل الخط  $M_H$  بدء تكون المارتنسيت.

التحول المارتنسيقي: عند سرعات التبريد الأعلى من  $150^\circ\text{C}/\text{sec}$  تختفي الدرجة الحرجة العليا  $A'_r$  (الشكل 8-19) ويبدأ الأوستنيت في التحول دون انتشار إلى مارتنسيت  $(c)$   $\text{Fe}_\alpha$  ويختلف هذا التحول عن تحول الأوستنيت إلى برليت بأن الأخير يصحبه انتشار.

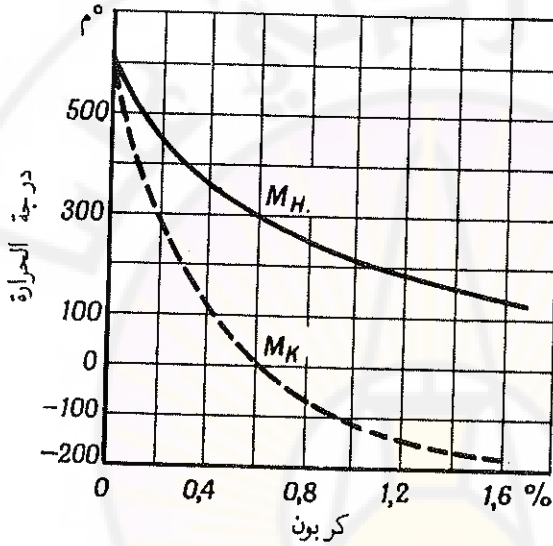


الشكل 8-19

تأثير سرعة تبريد الفولاذ اليونكتوئيدي إلى الدرجة الحرجة

المارتنسيت: هو محلول الفحم في حديد  $\alpha$  بشكل يتعدى حد الإشباع مما يجعل شكل الهيكل الشبكية للبلورات تتشوه بحيث يأخذ واحداً شكل رباعي بدلاً من شكله الأصلي المكعب، والاجهادات الداخلية الناجمة عن هذا التغير في الشكل هي التي تسبب القساوة الكبيرة للمارتنسيت. ويتم الحصول على المارتنسيت بتسخين الفولاذ إلى الحالة الأوستينية ثم يبرد بسرعة تزيد عن السرعة الحرجة وبالتالي لا نسمح بانفصال السمنتيت ويبقى الكربون ذائباً في الحديد بعد تحوله إلى  $\alpha$ .

السرعة الحرجة للتقسية: هي أصغر سرعة لتبريد الفولاذ تلزم لكي يصل تجاوز تبريد الاوستنيت إلى نقطة المارتنسيب  $M_H$  (الشكل 8-20). وتتوقف قيمتها على التركيب الكيميائي للأوستنيت. فتتخفض السرعة الحرجة بزيادة نسبة الكربون حتى 0.8% كما تنخفض هذه السرعة عند وجود عناصر سبائكية بالآوستنيت.



الشكل 8-20

تأثير نسبة الكربون على درجة حرارة بداية  $M_H$  ونهاية  $M_K$  التحول المارتنسيبي

## 2-2-8 تكنولوجيا المعالجة الحرارية للفولاذ:

### إزالة الإجهادات:

يطبق هذا النوع من التلدين ( Annealing ) على المسبوكات والمنتجات الملحومة والأجزاء المشكولة ميكانيكياً أي بالتشكيل على الساخن أو على البارد. حيث ينشأ في هذه القطع إجهادات متبقية أثناء العمليات التكنولوجية وذلك كنتيجة لعدم انتظام التبريد أو عدم تجانس التشكيل، وإزالة مثل هذه الإجهادات يجب معالجة القطعة حرارياً وذلك بتسخينها إلى درجة حرارة دون  $A_1$  ( تتراوح بين  $500^{\circ}C - 650^{\circ}C$  ) وإبقاء القطعة فترة زمنية تتناسب مع سماكة القطعة ثم تبرد ببطء إلى درجة الحرارة العادية.

### إعادة التبلور:

يتعرض الفولاذ أثناء عملية التشكيل الميكانيكي وخاصة على البارد إلى تشوه شكل البلورات بحيث تتكسر وتستطيل باتجاه التشكيل وكذلك تتغير الخواص الميكانيكية للقطعة. وللتخلص من ذلك تخضع القطع لإعادة التبلور وتعتمد هذه الطريقة على نشوء بذرة جديدة للتبلور يمكن إعادة تبلور البنية حول هذه البذرة. ويتم ذلك عن طريق التسخين إلى درجة حرارة تتراوح غالباً بين  $500^{\circ}C - 700^{\circ}C$  ثم الإبقاء في هذه الدرجة فترة زمنية تتراوح بين الساعتين والست ساعات وذلك حسب سماكة القطعة ثم تبرد ببطء إلى الدرجة العادية.

### التطرية:

إن الغاية من التطرية جعل بنية الفولاذ أطرى ما يمكن دون تغيير نوعية البنية وذلك لتسهيل عمليات التشكيل والتشغيل. ويتعلق مقدار التطرية بتركيب الفولاذ (خصوصاً نسبة الكربون).

ويمكن القول أن الغاية الأساسية من التطرية هي تحويل البنية البرليتية العادية (الصفائحية) إلى بنية برليتية حبيبية ناعمة. وتتم التطرية في الأفران

وذلك بتسخين القطعة إلى مادون الدرجة  $A_1$  (درجة حرارة التطرية ما بين  $^{\circ}C$  600÷700) حيث يتم إبقاؤها لفترة تتعلق بسماكة القطعة ثم تبرد تبريداً بطيئاً وبهذه العملية تتحطم صفائح السمنتيت الموجودة في البرليت وتتحول إلى حبيبات ناعمة وغالباً ما تستغرق العملية فترة زمنية طويلة، ولزيادة سرعة التحول يمكن إتباع طريقة التطرية الاهتزازية وذلك بجعل درجة الحرارة ترتفع إلى ما فوق  $A_1$  بقليل ثم تنخفض إلى ما دونها عدة مرات وذلك بسرعة كي لا تتحول البنية إلى بنية أوستنيتية.

#### التطرية في درجة حرارة ثابتة (ايزوترمية):

إن الغاية من هذه العملية تطرية القطعة وتحويل بنيتها إلى بنية برليتية حبيبية. وتتم التطرية الايزوترمية بتسخين القطعة ببطء إلى درجة حرارة الخط  $GSK + (30 \div 50)$  (فوق  $A_3$  بقليل). توضع بعد ذلك في فرن آخر درجة الحرارة أقل من  $A_1$  بقليل ( $^{\circ}C$  630÷700) حيث تترك هناك فترة من الزمن كافية لتحول الأوستنيت إلى برليت أولاً ثم تحول البرليت الصفائحي إلى برليت حبيبي.

#### الإحماء الانتشاري (التلدين الانتشاري):

يطبق التلدين الانتشاري على الفولاذ السبائكي بهدف تقليل الاختلاف في التركيب الكيميائي الداخلي. البلورات، ويزيد هذا الاختلاف في التركيب الكيميائي من ميل الفولاذ إلى الكسر واختلاف الخواص في الاتجاهات المختلفة. وعند إجراء التلدين الانتشاري يجب التسخين إلى درجة حرارة عالية ( $^{\circ}C$  1100÷1200)، بحيث تصبح ذرات العنصر السبائكي قادرة على الانتقال داخل القطعة وإعادة انتشارها. أما الفترة الزمنية اللازمة للإبقاء في درجة الحرارة فتتراوح بين بضع ساعات وبضعة أيام (بما في ذلك التسخين والإبقاء والتبريد).

البطيء). وذلك تبعاً لتركيب الفولاذ ووزن الشحنة. وكنتيجة للتلاين الانتشاري يتضخم حجم الحبيبات ويمكن إزالة هذا العيب بإعادة التبلور.

### التقسية (السقاية):

تعتبر التقسية أكثر عمليات المعالجة الحرارية استعمالاً وغايتها الحصول على القطعة بأكبر قساوة ممكنة وذلك عن طريق تحويل البنية البرليتية العادية للفولاذ إلى بنية مارتنسييتية. وتتخلص هذه العملية بتسخين القطعة المراد تقسيته إلى فوق درجة الحرارة الحرجة وإبقائها في تلك الدرجة فترة من الزمن ثم تبريدها تبريداً سريعاً (بسرعة أكبر من سرعة التبريد الحرجة) وذلك بتغطيسها فجأة في الماء أو الزيت أو في حوض من الأملاح المصهورة.

تسخن خلائط الفولاذ ما قبل اليوتكتونيد (البنية برليتية – فريتية) إلى ما فوق الدرجة  $A_3$  (درجة حرارة المنحني GS) بحوالي  $50 \div 30^\circ C$  بحيث تصبح البنية أوستينية متجانسة الأمر الذي يجعلها قابلة للتحويل كلياً إلى مارتنسييت عند السقاية. أما إذا اختصر التسخين إلى درجة حرارة واقعة بين  $A_1$  و  $A_3$  ففي هذه الحالة يتحول البرليت وحده إلى أوستينيت بينما يبقى الفريت في البنية على شكل طور مستقل ويستمر في بقائه حتى في البنية المقساء، وتصبح البنية بعد التقسية مؤلفة من المارتنسييت والفريت وتسمى هذه الطريقة بالمعالجة بين الحرجتين.

أما خلائط الفولاذ ما بعد اليوتكتونيد (البنية برليت – سمنتيت II) فيقتصر في تسخينه عادة إلى درجة حرارة لا تزيد عن  $A_1$  بأكثر من  $50 \div 30^\circ C$  حيث يتحول البرليت فقط إلى أوستينيت أما السمنتيت فلا يذوب إلا بشكل جزئي. وبعد التقسية وتحويل الأوستينيت إلى مارتنسييت يبقى السمنتيت محافظاً على وجوده الحر وهذه البنية ذات قساوة وقوة تحمل أكثر مما لو سخنت إلى ما فوق الخط ES، وذلك لأن السمنتيت أقسى من المارتنسييت من جهة ومن

جهة أخرى فإن التسخين إلى درجة حرارة عالية يعمل على زيادة حجم البلورات ونقص بالخواص الميكانيكية.

يتعلق زمن الإبقاء في درجة حرارة التسخين بعدة أمور أهمها:

- أ - تركيب الفولاذ وخاصة نسبة الكربون. فكلما كانت نسبة الفريت أو السمنتيت المراد إذابتها في الأوستنيت أكبر طالت فترة التسخين.
- ب - سماكة القطعة المسخنة حيث أن فترة التسخين اللازمة تتناسب طرذاً مع سماكة القطعة.

ج - نوع التسخين المتبع، حين يمكن أن يتم التسخين بعدة أشكال إما بوضع القطع في فرن بارد وتسخين القطعة مع الفرن، أو توضع القطعة في فرن مسخن مسبقاً أو توضع في أفران متتالية في تدرج الحرارة. يجب ألا تزيد فترة الإبقاء عن المقدار اللازم لاتمام التحولات وذلك بسبب إمكانية ازدياد في حجم بلورات الأوستنيت.

أما في ما يتعلق بالمرحلة الأخيرة من مراحل التقسية وهي تبريد القطعة فإن التبريد يجب أن يتم بسرعة أكبر من السرعة الحرجة للفولاذ، وهذه السرعة تختلف باختلاف نوعية الفولاذ وتركيبه الكيميائي غير أن سرعة التبريد يجب ألا تزيد كثيراً عن السرعة الحرجة كي لا تزيد الاجهادات في القطعة عن الحد الضروري للحصول على البنية المارتنسية. حيث أن زيادة الاجهادات قد تعمل على تشويه شكل القطعة أو تصدعها، لهذا فإن مغاطس التبريد يجب أن تتم انتقاؤها بحث تعطي سرعة تبريد لا تزيد كثيراً عن السرعة الحرجة اللازمة لتشكيل المارتنسيت. ومغاطس التبريد المستعملة هي الماء أو الزيت في حال الفولاذ الكربوني والزيت وأملاح مصهورة ومعادن مصهورة وتيار هوائي وهواء ساكن لتبريد الفولاذ السبائكي.



لا يصلح الفولاذ المقسى ذو البنية المارتنسيكية للاستعمال بعد سقاية مباشرة نظراً لهشاشيته وقابليته الشديدة للكسر وذلك نتيجة للاجهادات الكبيرة التي تنشأ في البنية. لذلك يجب إزالة هذه الاجهادات أو جزء منها قبل الاستعمال وذلك بإرجاعه.

### الإرجاع:

تتلخص عملية الإرجاع في تسخين الفولاذ المقسى حتى درجة حرارة تقل عن  $A_1$  ثم الإبقاء في درجة الحرارة المختارة مع التبريد بسرعة معينة. والإرجاع هو عملية نهائية من عمليات المعالجة الحرارية ويحصل الفولاذ نتيجة لذلك على الخواص الميكانيكية المطلوبة. ويؤدي الإرجاع إلى إزالة الاجهادات الداخلية التي تنشأ أثناء التقسية إزالة كلية أو جزئية. ولدرجة حرارة الإرجاع التأثير الحاسم على خواص الفولاذ، لهذا يقسم الإرجاع إلى ثلاث أنواع:

**الإرجاع في درجة حرارة منخفضة:** ويجري بالتسخين حتى  $250^{\circ}\text{C}$ . وفي هذه الحالة تقل الاجهادات الداخلية وتزداد المتانة وترتفع متانة الصدم قليلاً دون انخفاض ملحوظ في القساوة. ويطبق هذا الإرجاع على أدوات القطع والقياس المصنوعة من الفولاذ الكربوني والفولاذ منخفض السبائكية. ويتراوح عادة زمن الإرجاع في حدود 1-2.5 ساعة.

**الإرجاع متوسط درجة الحرارة:** يجري هذا الإرجاع في درجات حرارة تتراوح بين  $350^{\circ}\text{C}$  و  $500^{\circ}\text{C}$  وتستخدم أساساً للنوابض الملتفة والنوابض الصفائحية والقلوب. ويوفر هذا الإرجاع حداً عالياً للمرونة والتعب. وتتكون بنية الفولاذ بعد الإرجاع المتوسط من تروستيت وتتراوح قساوته  $40 \div 50 \text{ HRC}$ .

**الإرجاع مرتفع درجة الحرارة:** يجري عند درجة حرارة  $680^{\circ}\text{C}$  وتتكون بنية الفولاذ بعد الإرجاع المرتفع من سوريبت. ويزيد

الإرجاع المرتفع من قيم مقاومة الشد واجهاد الخضوع والاستطالة ومثانة الصدم.

العيوب الأساسية في الفولاذ الناتجة عن المعالجة الحرارية والتدابير المتخذة لإزالتها:

| العيوب وصفاتها                                                                                                                     | الأسباب                                                                                                            | الأساليب من أجل تصحيح الخلل أو العطل                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| تسخين زائد<br>:overheatin<br>بنية حبيبية<br>مجهريّة خشنة<br>وانكسار، تقلل من<br>المطيلية وكذلك<br>تقلل خصوصاً من<br>مقاومة الصدم.  | التسخين لفترات زمنية<br>طويلة بدرجات حرارة تعتبر<br>أعلى من القيم المحددة.                                         | الإزالة (المعالجة)<br>Elimination<br>1 — من أجل تسخين زائد<br>خفيف: استخدام annealing<br>& normalizing<br>2 — من أجل تسخين وافر<br>كبير استخدام: annealing<br>أو normalizing نستخدم<br>تخمير مضاعف الأول عند<br>درجة حرارة 100-150+<br>Ac3 والثانية بدرجات حرارة<br>عادية ونظامية. |
| احتراق حدود<br>الحبيبات ويشمل:<br>1 — مناطق غنية<br>بالكربون وهي<br>المرحلة الأولى<br>من الاحتراق.<br>2 — لا توجد<br>تجاويف مؤكسدة | التسخين لفترة طويلة عند<br>درجة حرارة عالية في غلاف<br>جوي مؤكسد ذو درجة<br>حرارة قريبة من درجة<br>حرارة الانصهار. | 1 — المرحلة الأولى:<br>استخدام عملية التجانس متبوع<br>بتخمير مضاعف.<br>2 — المرحلة الثانية: استخدام<br>التطريق متبوع بالتخمير.<br>3 — المرحلة الثالثة: العطل<br>لا يمكن إصلاحه.                                                                                                    |

| العيوب وصفاتها                                                                                                                                          | الأسباب                              | الأساليب من أجل تصحيح الخلل أو العطل                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| وثقوب وهي المرحلة الثانية.<br>3 - شوائب دخيلة من أكسيد الحديد وهي المرحلة الثالثة الكسر أو التصدع الناتج يشبه مقطع كسر الحجارة (التفلق) وقليل المطيلية. |                                      |                                                                                                                                                                                                                 |
| الأكسدة: طبقة سميكة من القشور تتكون على سطح قطع الفولاذ.                                                                                                | الغلاف الجوي مؤكسد في أفران التسخين. | السوقاية من الأعطال (العيوب)<br>1 - التسخين في أفران ذات وسط مرجح، غلاف جوي محايد أو واق.<br>2 - التسخين في صناديق مع استخدام أوساط كرينة مستخدمة أو رقائق من حديد الصلب.<br>3 - التسخين في أحواض ملحية منصهرة. |
| نزع الكربون Decarburisati on التقليل من                                                                                                                 | أكسدة الغلاف الجوي في أفران التسخين. | الأساليب لتجنب هذا العيب مشابهة للرقم (3) في الفقرة أعلاه: تصحيح الخلل: يجب                                                                                                                                     |

| العيوب وصفاتها                                                                                                            | الأسباب                                                                                                                                                                    | الأساليب من أجل تصحيح الخلل أو العطل                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| الكربون من طبقات السطح للأدوات، قساوة أخفض بعد السقاية ومقاومة إعياء منخفضة.                                              |                                                                                                                                                                            | أعلاه: تصحيح الخلل: يجب إجراء التشغيل الميكانيكي للطبقة المنزوعة الكربنة وذلك إذا سمحت بذلك تسامحات التشغيل.                                                                                                                            |
| القساوة الزائدة لفولاذ مشكل على الساخن ومخمّر.                                                                            | معدل تبريد زائد من أجل تليدين عادي أو زمن الحجز بالفرن غير كافى من أجل عملية التليدين (annealing) في درجة حرارة ثابتة.                                                     | إعادة التليدين مع التبريد بمعدل محدد.                                                                                                                                                                                                   |
| كسر أسود بسبب شوائب الغرافيت الموجود في الفولاذ.                                                                          | زمن تسخين زائد أو تبريد بطيء بعد عملية التليدين.                                                                                                                           | تسخين الفولاذ إلى درجة حرارة عالية وإجراء عملية التطريق له بشكل كامل.                                                                                                                                                                   |
| التشققات الناتجة عن السقاية: تظهر عادة على حدود الحبيبات وتكون على شكل خط متعرج ، التشققات الحاصلة يمكن أن تكون خارجية أو | 1 - إجهادات داخلية بسبب التغيرات الحجمية عند درجات حرارة منخفضة بسبب التحول المارتنسيتي.<br>2 - إن التحول المارتنسيتي الحاصل غير متزامن عبر كامل القطعة أو الأداة المقاسة. | الخلل لا يمكن إصلاحه ولكن يمكن تجنبه بالطرق التالية:<br>1 - تجنب الزوايا الحادة، والانتقال المفاجئ مع مقطع رقيق إلى مقطع ثخين عند تصميم الأدوات والقطع.<br>2 - يجب أن تحرر الأدوات المعدنية من الإجهادات قبل أن تقسى وأن تزال الإجهادات |

| العيوب وصفاتها                      | الأسباب                                                                                                                                                                                     | الأساليب من أجل تصحيح الخلل أو العطل                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| داخلية.                             |                                                                                                                                                                                             | <p>الداخلية بواسطة عملية التلدين.</p> <p>3 - التسخين إلى درجة حرارة مستقرة أصغرية من أجل عملية التقسية.</p> <p>4 - التبريد ببطء في المجال المارتنسي (استخدام التبريد المنقطع والتبريد بالزيت والسقاية غير التقليدية martempering).</p> <p>5- استخدام طريقة المعالجة غير التقليدية.</p> <p>6 - يجب إجراء الإرجاع Temper للمعدن بشكل فوري بعد السقاية.</p> |
| التشوهات وتغيرات الحجم بعد التقسية. | <p>1 - حجم قطعة الفولاذ يزداد بسبب التحول المارتنسي.</p> <p>2 - قابلية التقسية الأعلى للفولاذ.</p> <p>3 - إن التشوهات الناتجة عما سبق ستكون شديدة وأكثر عنيفاً وذلك بسبب عملية التقسية.</p> | <p>1 - استخدام خلاط الفولاذ التي تتشوه بشكل طفيف أثناء التقسية.</p> <p>2 - التبريد ببطء في المجال المارتنسي.</p> <p>3 - استخدام التقسية السطحية حيثما أمكن ذلك.</p>                                                                                                                                                                                      |

| العيوب وصفاتها                                                                    | الأسباب                                                                                                                                                                                                                                  | الأساليب من أجل تصحيح الخلل أو العطل                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| فتل و الستواء القطعة المعالجة وذلك بسبب التشوهات غير المتناظرة ( assymetrical ) . | <p>1 - تغيرات الحجم أثناء التبريد أو التسخين .</p> <p>2 - تسخين أو تبريد غير منتظم للأدوة .</p> <p>3 - إجهادات داخلية في القطعة المعدنية قبل التسخين .</p> <p>4 - غمر القطعة المعدنية في حوض التبريد بشكل مائل (inclined position) .</p> | <p>مثلما سبق أعلاه وكالاتي:</p> <p>1 - التلدين ( Annealing الإرجاع temper التطبيع Normalise بدرجة حرارة عالية قبل التقسية .</p> <p>2 - التسخين بشكل منتظم من أجل التقسية .</p> <p>3 - التبريد بشكل منتظم ما أمكن خلال التقسية .</p> <p>4 - إمساك القطعة وغمرها بشكل صحيح ومناسب في حوض السقاية .</p> <p>5 - استخدام مثبتات خاصة أثناء السقاية . إن الخلل أو العيب أو التجليخ .</p> |
| قساوة غير كافية بعد التبريد .                                                     | <p>1 - درجة حرارة التقسية منخفضة جداً .</p> <p>2 - زمن التسخين غير كاف عند درجة التقسية .</p> <p>3 - معدل التبريد منخفض بشكل كبير .</p>                                                                                                  | <p>يمكن تصحيح العيب من خلال التطبيع Normalisa أو التخمير Annealing متبوعاً بواسطة التقسية بالإجراء المناسب والمتحدد .</p>                                                                                                                                                                                                                                                          |
| مواضع وأماكن طرية على سطح الجزئي المقسى                                           | <p>1 - تجمع البخار (تشكل فقاعات) على سطح الجزئيات المبرد بخفض معدل التبريد</p>                                                                                                                                                           | <p>1 - استخدام وسط تبريد أكثر فعالية .</p> <p>2 - استخراج تراكيب أكثر</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

| العيوب وصفاتها                                                            | الأسباب                                                                                                                                                                                               | الأساليب من أجل تصحيح الخلل أو العطل                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| مع قساوة منخفضة.                                                          | في تلك المواقع.<br>2 - حصول تمرکز بإعادة نزع الكربون.<br>3 - عدم التجانس في التركيب الأولي عند تجمد الفولاذ.                                                                                          | تجانساً باستخدام التلدين أو إزالة الاجهادات قبل إجراء التقسية.<br>3 - السوفاية من عملية نزع الكربنة أثناء التسخين.                       |
| قساوة زائدة بعد الإرجاع (Tempering).                                      | درجة حرارة منخفضة أو زمن تسخين غير كاف أثناء عملية الإرجاع.                                                                                                                                           | يصحح الخلل من خلال عملية الإرجاع الثانية بدرجة الحرارة مناسبة وزمن مناسب.                                                                |
| قساوة غير كافية بعد إرجاع المعدن.                                         | درجة حرارة الإرجاع عالية جداً.                                                                                                                                                                        | التلدين وإعادة التقسية وإجراء الإرجاع بدرجة حرارة مناسبة.                                                                                |
| تواجد تآكل كيميائي وتنقر أو تشكل أخاديد مؤدية لإتلاف سطح القطعة المعدنية. | التسخين في أحواض ملحية مصهورة:<br>1 - ذات محتوى عالي من الأملاح الكبريتية.<br>2 - أن يكون الحوض غني بالأكسجين أو أكسيد الحديد.<br>3 - التسخين في أفران اللهب، وتشكل قشور أكسدة غير موحدة وغير منتظمة. | 1 - التحكم بدقة بالتركيب الكيميائي الأملاح.<br>2 - إزالة الأكسدة من الحوض.<br>3 - إزالة الغلاف الجوي المؤكسد عند التسخين في أفران اللهب. |

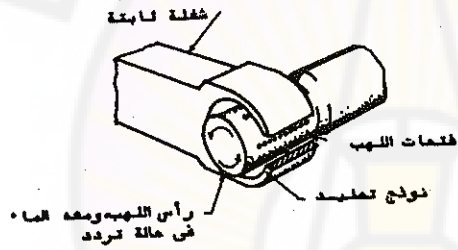
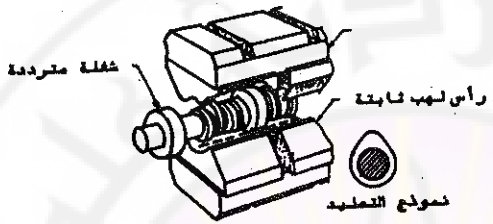
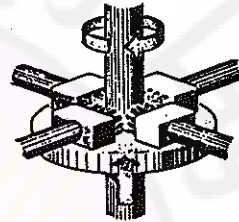
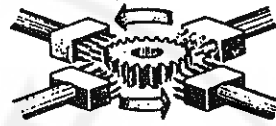
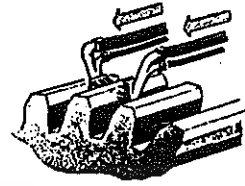
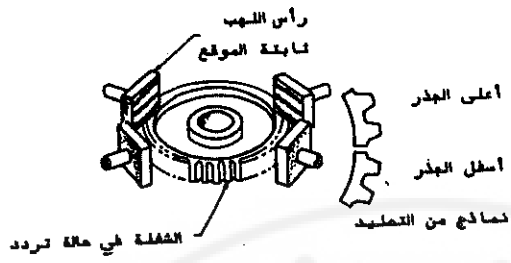
### المعالجات الحرارية السطحية:

تستعمل هذه الطرق عندما نحتاج إلى قطعة ما تمتاز بسطح قاس مقاوم للاحتكاك والتآكل ويلب متين مرن وغير هش لذلك نعتمد إلى تقسية سطح القطعة فقط مع المحافظة على بنية وسطها. وتقتصر على عملية تحويل البنية إلى بنية مارتنستية لسطح قطع الفولاذ وذلك بتسخين السطح بحيث تتحول البنية فيه ولعمق محدد إلى أوستنيت ثم تبريده تبريداً سريعاً. وباختلاف طرق التسخين نميز طريقتين للتقسية السطحية وهما التقسية باللهب والتقسية بالتحريض.

#### أ- التقسية باللهب:

يستعمل لهذه الغاية لهب ذو درجة حرارة مرتفعة وذلك كي يتم تسخين السطح بسرعة وقبل أن يسخن داخل القطعة ويتحول بدوره إلى أوستنيت ثم يبرد السطح تبريداً مفاجئاً. وأفضل لهب يصلح لهذه الغاية هو اللهب الناتج عن احتراق الاستيلين بالأوكسجين. تختلف الرؤوس المستعملة للتسخين باختلاف شكل القطع المراد معالجتها فإما أن تكون هذه الرؤوس على شكل أنابيب مستوية مثقبة أو على شكل حلقات مثقبة. أما رؤوس التبريد فهي تتبع في شكلها شكل رؤوس التسخين ويبين الشكل 8-21 هذه الطريقة.





الشكل 8-21

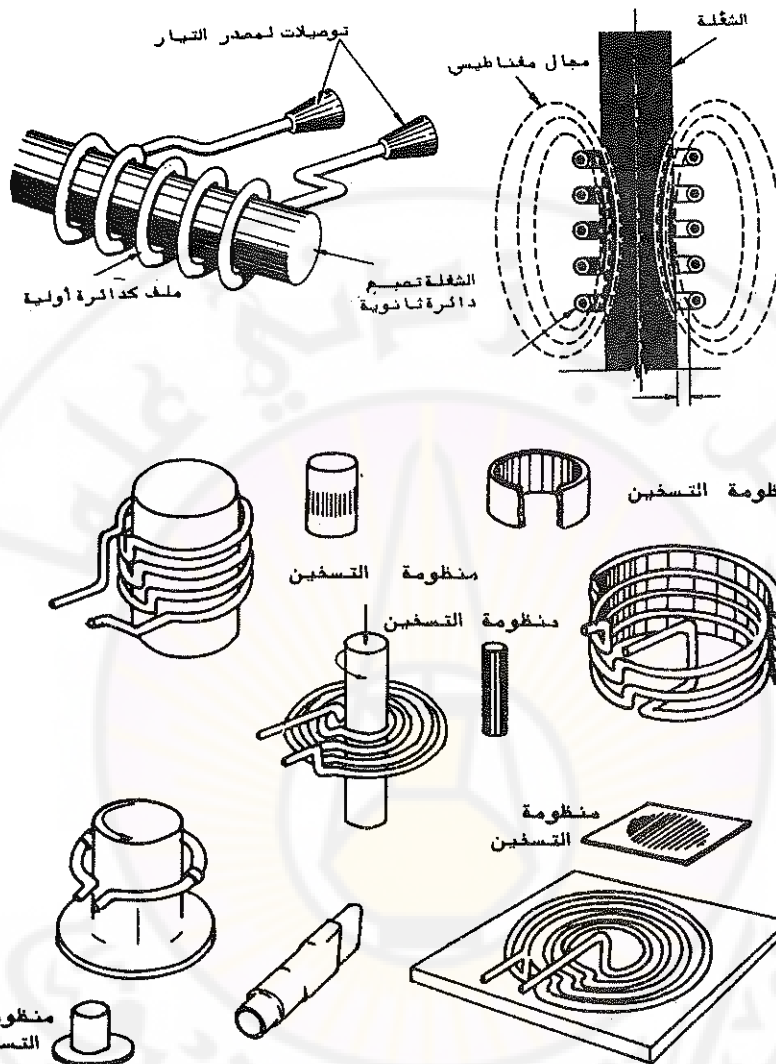
التقسية السطحية بالذهب

## ب- التقسية بالتحريض:

يستعمل في هذه الطرق في التسخين تيار كهربائي عالي التردد وأهم مميزات هذه الطريقة أن السطح المعالج بالتحريض يكون أكثر تجانساً من المعالج باللهب كما أن هذه الطريقة أكثر صلاحية للإنتاج الكمي.

ويعتمد التسخين في هذه الطريقة على مبدأ التحريض أي أنه إذا مررنا تياراً متناوباً في وشيعة ما فإن ساحة مغناطيسية متغيرة سوف تنشأ حول هذه الوشيعة وإذا وضعنا ناقلاً (قضيب من الفولاذ) في هذه الساحة فإن تياراً سوف يجري في هذا الناقل ويعمل إلى تسخين القطعة المار فيها. تكون كثافة هذا التيار أكبر ما يمكن عند السطح وتتناقص باتجاه الداخل وتتناقص لوغاريثمياً.

تصنع الوشائع المستخدمة لهذه الغاية على الشكل أنابيب من النحاس يمرر بداخلها تيار من الماء لتبريدها لأن الوشائع نفسها أيضاً ترتفع درجة حرارتها. أما أشكال هذه الوشائع فتتخفف باختلاف أشكال القطع المراد معالجتها كما أنها يمكن أن تكون ثابتة أو متحركة كما هو الحال في رؤوس التسخين في طريقة اللهب وكذلك لا تختلف رؤوس التبريد عن الرؤوس المستعملة بالطريقة السابقة. ويبين الشكل 8-22 مبدأ طريقة التقسية بالتحريض.



الشكل 8-22  
طريقة التقسية بالتحريض

### 8-2-3 المعالجة الحرارية لخلات الحديد الصلب:

#### المعالجة الحرارية لخلات الحديد الصلب الأبيض:

تهدف المعالجة لمثل هذه الخلطات للتخلص من السمنتيت والذي يتم بإحدى الطريقتين، إما بجعل هذا السمنتيت يتفكك إلى غرافيت كروي، وتسمى الخلطات الناتجة عن هذه المعالجة بخلات الحديد الصلب السوداء المعالجة. وإما بالعمل عند انفصال الكربون على شكل غرافيت كروي، على طرد هذا الغرافيت من البنية والتخلص منه، وتسمى هذه الخلطات المعالجة بهذا الشكل بخلات الحديد الصلب البيضاء والمعالجة.

يتم الحصول على الخلطات الصلب السوداء المعالجة بالتسخين إلى درجة حرارة  $900^{\circ}\text{C} \div 950$  وإبقاؤها فترة من الزمن ثم تبريد ببطء إلى درجة الحرارة العادية، أما خلطات الحديد الصلب البيضاء المعالجة فنحصل عليها بالتسخين إلى درجة حرارة  $900^{\circ}\text{C} \div 950$  في جو مؤكسد ويتم إبقاء القطعة لعدة أيام.

#### المعالجة الحرارية لخلات الحديد الصلب الرمادي:

أ- إزالة الاجهادات الداخلية بالمسبوكات المعقدة الشكل: تسخين السبوكة ببطء ( $75-100$  درجة بالساعة) حتى درجة الحرارة  $500^{\circ}\text{C} \div 550$  ثم إبقائها عند هذه الدرجة لمدة 2-5 ساعات ثم تبريد ببطء في الفرن حتى الدرجة  $200^{\circ}\text{C}$ .

ب- التلدين لإنقااص القساوة ولزيادة قابلية التشغيل تسخين القطعة إلى درجة  $850^{\circ}\text{C} \div 900$  لمدة 1-2 ساعة.

ت- استبدال (مراجعة) الحديد الصلب الرمادي: يتم تسخين إلى درجة  $850^{\circ}\text{C}$   $870 \div$  لزيادة نسبة الكربون المتحد بإذابة جزء من الكربون الحر في الأوستنيت ثم تبريد القطعة في الهواء للحصول على بنية من السوربيت.

ث- تقسية الحديد الصب الرمادي: يتم ذلك للحصول على بنية من المارتنستيت أو التروستيت أو السوربيت وتتراوح درجة حرارة التسخين في حدود  $900 \div 820^{\circ}\text{C}$  .

ج- إرجاع الحديد الصب الرمادي: عند درجة حرارة منخفضة  $180^{\circ}\text{C} \div 250$  لإزالة الاجهادات. وعند درجة حرارة مرتفعة  $600 \div 500^{\circ}\text{C}$  للحصول إلى سوربيت.

### 8 - 3 تصنيف أنواع الفولاذ :

يتم تصنيف الفولاذ بشكل رئيسي إلى فولاذ كربوني وفولاذ سبائكي.

#### 8-3-1 الفولاذ الكربوني:

عبارة عن سبيكة من عنصري الحديد (Fe) والكربون (C) وتتراوح نسبة الكربون فيه من (0.02-2.14)% وإلى جانب الكربون توجد كميات ضئيلة من المنغنيز (Mn) أو السيليكون (Si) والكبريت (S) والفوسفور (P) بحيث لا تتعدى نسبة كل من المنغنيز والسيليكون حدود معينة وإلا اعتبرت عناصر سبائكية (نسبة  $0.39\% \text{Mn}$ ,  $0.15-0.35\% \text{Si}$ ) أما نسبتي الفوسفور والكبريت فلا تتعدى (0.06-0.07)% على الترتيب. وبما أن كميات هذه العناصر محددة فمن المفيد الوقوف على تأثير كل منها في الفولاذ.

تأثير العناصر المختلفة على خواص الفولاذ الكربوني (الاسبائكي):

تأثير الكربون C: يوجد الكربون عادة في الفولاذ على شكل اتحاد كيميائي ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) وتعمل زيادة نسبة الكربون على ازدياد قساوة الفولاذ وتتنخفض بنفس الوقت الاستطالة ومقاومة الصدم كما تسوء عمليات تشغيلها ولحامها.

تأثير المنغنيز (Mn): يضاف المنغنيز إلى الفولاذ للإسراع في عملية الإرجاع ورفع المتانة كما يحد وجود المنغنيز من تأثير الكبريت الضار إذ يميل

إلى تشكيل المركب (MnS) في حال وجوده إلى جانب الكبريت في الفولاذ كما أن وجود السمنتيت وكربيد المنغنيز في الفولاذ يؤثر تأثيراً كبيراً على تقسية الفولاذ. وإذا ما زاد المنغنيز (1.5%) انخفضت قابلية السحب للفولاذ.

تأثير السيليكون (Si): يعتبر عنصر السيليكون من العناصر المرجعة النشطة ويعمل على إرجاع (تخليص) الحديد من أكاسيده ويزيد من كثافة الفولاذ. ومع انخفاض نسبة السيليكون في الفولاذ تصبح عملية الإرجاع غير فعالة. وعندما يوجد السيليكون بنسبة أقل من (0.2%) يذوب كلياً في الفريت ويكون أثره ضئيلاً أما إذا وجد بكميات أكبر حتى (0.4%) فإنه يعمل على رفع حد المرونة والإجهاد الأعظمي بدون تأثير كبير على انخفاض قابلية السحب.

تأثير الكبريت (S): يتواجد الكبريت مع الفولاذ وبشكل رئيسي على هيئة كبريت الحديد (FeS). ويعتبر عنصر غير مرغوب فيه وضار وبإضافته إلى الفولاذ يصبح قصيفاً عند درجات الحرارة العالية كما وأنه يؤثر على خواص الفولاذ فيعمل على خفض مقاومة التعب ومقاومة الأكسدة. وبشكل عام يجب أن لا تتجاوز نسبة الكبريت في الفولاذ % (0.07-0.06)

تأثير الفوسفور (P): يعتبر الفوسفور من العناصر الضارة أيضاً إذ يتفاعل مع الحديد ليشكل (FeP) الذي ينحل معه ويصبح تركيبه البلوري ضعيفاً للغاية إذ يتوضع على حدود بلورات الحديد ليقبل بذلك قوى التجاذب بينها ونتيجة لذلك يصبح الفولاذ قصيفاً وخاصة في الحالة الباردة. وفي الوقت الذي يعتبر فيه الفوسفور والكبريت من العناصر الضارة إلا أنهما يعملان على تحسين عملية التشغيل للفولاذ وأيضاً عدة القطع. بالإضافة إلى العناصر التي ذكر تأثيرها فإن الغازات الموجودة في الفولاذ تؤثر وبشكل ملحوظ على خواص الفولاذ أيضاً.

تأثير الغازات (النيتروجين، الأوكسجين، الهيدروجين): تؤثر هذه الغازات بشكل سلبي على خواص الفولاذ حيث يعمل الأوكسجين والنيتروجين على خفض متانة الفولاذ أما الهيدروجين فيؤثر بشكل فعال على المتانة والاستطالة النسبية.

### 8-3-2 فولاذ الإنشاءات:

وهو الفولاذ الذي يؤلف المشغولات لمختلف الأغراض الإنشائية وأجزاء الآلات العادية والذي يمثل نسبة كبيرة من مجل الإنتاج العالمي (أكثر من 90%) تصنيفه للأقسام التالية:

أ - فولاذ الإنشاءات العادي أو العام: هو فولاذ كربوني بسيط ويمكن تحديد المفاهيم الخاصة به كما يلي:

بحسب النظام القياسي الألماني: ينظر إلى متانة الشد بشكل رئيسي لهذا النوع من الفولاذ وهي تابعة لنسبة الكربون بالزيادة مع نقصان المطيلية فتزداد قصافته وقابليته للتشكيل واللحام بالانصهار والقطع ويبين الجدول 8-2 مثلاً على ذلك. وتستخدم هذه الأنواع من الفولاذ في عمليات التشكيل والمطروقات وفي صناعة المحاور والأعمدة والمسندات وفي الأبنية والجسور.. إلخ.

الجدول 8-2 تغير خواص الفولاذ تبعاً للنوع

| الفولاذ                       | St 34 | St 70 |
|-------------------------------|-------|-------|
| نسبة الكربون %                | 0.17  | 0.50  |
| الاستطالة %                   | 28    | 10    |
| $\sigma_t$ kg/mm <sup>2</sup> | 42-34 | 85-70 |

وبحسب النظام القياسي الروسي تكون الأنواع CT.0 و CT.1.. إلخ هي الأنواع الموافقة لفولاذ الإنشاءات العادي المذكور وتبلغ نسبة الكربون في النوع

CT.1 % (0.06-0.12) أما نسبة الكبريت فتصل إلى % (0.06) والفوسفور % 0.07 أما بقية أنواع المجموعة (6) فتصل نسبة الكبريت والفوسفور % 0.05 و % 0.04 على الترتيب وتستخدم أنواع الفولاذ الكربوني الإنشائي بجودة عادية كالتالي:

CT.1, MCT.1, KcT.1 في البرشمة، الألواح الفولاذية والمراحل الفولاذية.

CT.3, MCT.3 KC.T.3 في البراغي، الصواميل، البرشمة، الدبابيس

CT.4, MCT.4, KcT.4 في صناعة المسننات

CT.5, MCT.5 KcT.5 في صناعة المحاور والأعمدة

CT.6, MCT.6, KcT.6 في صناعة مقاطع السكك الحديدية، الإطارات والكامات والمحاور الدورانية.

CT.7, MCT.7, KcT.7 في صناعة النوايض

ب - فولاذ الأتمتة: يجب أن يتمتع الفولاذ المطلوب تشغيله على المخارط الأوتوماتيكية بخاصية التشغيل الجيدة أي يجب أن تكون الشظايا منقطعة غير مستمرة (قصيرة) لتناسب الحيز الضيق لهذه الآلات ويمكن زيادة خاصية التشغيل بإضافة الكبريت. بكمية مناسبة وكذلك الرصاص (0.3-0.15 %) فتتقصف بموجب ذلك الشظايا وتنتج أسطح صقيلة. وتتمتع أنواع الفولاذ 9S20 بقابلية قطع أكبر ما يمكن والتي تحتوي على % 0.13 كربون وتنخفض هذه القابلية بزيادة نسبة الكربون ونتيجة للصب بالتخمير.

ج - فولاذ التقسية السطحية بالتغليف: تصنع المشغولات التي تطبق عليها قوى وإجهادات مختلفة من فولاذ منخفض الكربون وتعديل النسبة في السطح لتجابه متطلبات قوى الاحتكاك (التآكل الاحتكاكي) وما شابه ذلك من حيث يتمتع القلب بالمتانة والجساءة اللازمين لمقاومة الالتواء والانحناء وغير



ذلك مثل البراغي والأعمدة والمسننات وأجزاء التحكم والتوجيه. ولذلك يجب أن لا تزيد نسبة الكربون في الفولاذ من هذا النوع عن 0.2% في حالة الفولاذ اللامركزي مثل CK10 وCK15 والسبيكي مثل 15Cr3 أو 17CrNiM.06 والتي تمتاز نسبياً عن أنواع الفولاذ الجيد مثل C10 وC15 بتجانس البنية وجودة إنهاء السطح وانخفاض نسبة الكبريت والفوسفور، وتبلغ القساوة في السطح (59) روكويل ومتانة الشد في القلب من (42) إلى (65) كغ/مم<sup>2</sup> للفولاذ اللامركزي ومن (60) إلى (145) كغ/مم<sup>2</sup> للفولاذ السبيكي.

د - فولاذ المراجعة: وهو كل نوع من الفولاذ الذي تطبق عليه عملية التقسية متبوعة بعملية مراجعة عند درجة حرارة عالية من (500-700) م° وذلك للأجزاء المعرضة لإجهادات صدمية ودفعية مثل أعمدة المرافق والأعمدة اللامركزية لآلات التنقيب (التخريم) وأعمدة المحاور للمركبات وتتراوح نسبة الكربون في هذا النوع من 0.2-0.60% وأمثلتها:

| نوع الفولاذ | درجة حرارة المراجعة (م°) |
|-------------|--------------------------|
| C22         | 660-550                  |
| CKCO        | 660-550                  |
| 42 CrM04    | 680-540                  |
| 43 Cr4N     | 680-540                  |
| 3OcrNiM08V  | 680-540                  |
| 43 CrNiM06V | 680-540                  |

وتتوقف خواص المتانة على التركيب الكيميائي لنوع الفولاذ وحالة المراجعة الحرارية (تليدين G) أو تخمير وتعديل (N) ومراجعة أو تطبيع (V) وأيضاً درجة حرارة المراجعة ومساحة المقطع ولذلك يرفق نوع المعالجة عند الترميز لتكون المعلومات كاملة عن النوع المطلوب. كما نعلم من الخواص الميكانيكية أن مقاومة الشد تنخفض بازدياد درجة الحرارة ويرتفع بذلك الانفعال. مثال:

الترميز: 34 CrNiMo6V

إذا ما روجع عند 500 م° تكون مقاومة الشد 140kg/mm<sup>2</sup> والانفعال 9% وإذا ما روجع عند 650 م° تكون مقاومة الشد 90kg/mm<sup>2</sup> وانفعال 9% وبناء على مساحة المقطع نجد أن: الفولاذ C55V اللاسبيكي تكون مقاومة الشد لقطر أكبر من 40 مم 65 kg/mm<sup>2</sup> ، ولقطر أقل من 16 مم 80 kg/mm<sup>2</sup> وذلك لعدم تقسيته حتى القلب.

هـ - فولاذ النترجة: من عملية التقسية السطحية بالتغليف وجدنا أن عملية النترجة تكسب الفولاذ في السطح صلادة عالية وإذا ما كان الفولاذ سبائكي (عند خلطة بالكروم والموليبدنيوم والألمنيوم) تزداد متانة القلب ومن معدل امتصاص النترجين وتستخدم عملية النترجة في أعمدة التجليخ السريعة والمحددات وأجهزة القياس الدقيق وتصل القساوة السطحية في فولاذ النترجة إلى (HRC 67). ومن أمثلتها:

31CrMo12 وهو لأنواع الفولاذ حتى قطر 80 مم

34CrALNi7 وهو لأنواع الفولاذ حتى القطر 250 مم.

و - فولاذ النوابض: يجب أن يتمتع الفولاذ المستخدم في إنتاج النوابض بالمرونة ومقاومة التعب أو الكلل مع المتانة العالية للشد وفي بعض الأحيان عند درجات حرارة مختلفة وخاصة عالية ولا تتوقف هذه الخواص على

تركيب الفولاذ الكيميائي بل تتغير بالمعالجة الحرارية أو التشكيل على البارد. وتستخدم في كثير من الأجزاء كصناعة المركبات (للأغراض العامة) أنواع الفولاذ اللاسبكي والسبيكي مثل 58 CrV4,55S17,C67 والأنواع المستخدمة عند درجات حرارة عالية كالمستخدمة في صناعة الصمامات لمحركات الاحتراق التي تحتفظ بخواص المتانة الجيدة حتى (550 م°) وتكون من أنواع الفولاذ السبيكي دائماً مثل (30WCrV179) الذي يحتوي على:

| V%        | W%       | Cr%       | C%        |
|-----------|----------|-----------|-----------|
| 0.60-0.45 | 4.50-3.8 | 2.70-2.20 | 0.35-0.25 |

وتبلغ مقاومة الشد لأسلاك قطر 0.5 مم بعد سحبها على البارد وبدون معالجة 190kg/mm<sup>2</sup> وبعد معالجتها بالتسخين إلى (850-1100) م° وتبريدها في حمام ملحي أو رصاصي درجة حرارته (400-550) م° أو تبريد في الهواء. وتصل المقاومة عند سرعة التبريد 200 م°/ثانية إلى 300kg/mm<sup>2</sup> للأسلاك الدقيقة بقطر 0.25 مم.

#### 4-3-8 فولاذ العدة:

تصنع منه أجزاء مواد التصنيع للمشغولات بواسطة القطع أو بدون قطع بحيث يكون المطلوب منها في هذه الحالة متطلبات خاصة وتتميز أنواع فولاذ العدة بأن نسبة الكربون فيها أكبر من (0.5%) وبشكل عام بصنف فولاذ العدة بحسب تركيبه إلى فولاذ عدة لاسبكي وفولاذ سبائكي منخفض الخلط وعالي الخلط.

وبغض النظر على التسميات التجارية تعطي المواصفات الألمانية تسميات وتعريفات يمكن استنتاج مواصفات التشغيل لها من تركيبها الكيميائي

مع اعتبار أنواع فولاذ العدة الكربوني وحتى اللاسبيكية منها أنواع مكررة لارتفاع درجة نقائها وإجراء معالجات إضافية لها بعناية.

أ - فولاذ العدة الكربوني: يكون العامل الرئيسي في تحديد مواصفات المنتج هنا هو نسبة الكربون من (0.5-1.5)% وتحدد بذلك نوعية استخدام الفولاذ تبعاً لقساوته التي تتم عند (760-850) م° مع مراجعة عند (200-300) م° بحسب الاستخدام .

ولكن أنواع هذا الفولاذ عندما تفوق بقساوتها فولاذ العدة عالية الجودة سرعان ما تفقدها فوق الدرجة 200 م° كما تكون درجة حرارة الحدادة لهذه الأنواع عند الدرجة 1000 إلى 8000 م° . ويستخدم للمحاور القابلة للحام الحدادي مع تشكيل أخاديد عميقة. أما عيوب الفولاذ الكربوني فهي:

- عدم إمكانية الحصول على القساوة والمتانة مع القبرة على التشكيل.
- فقدانها للقساوة وخواص القطع عند درجة الحرارة 200 C° وكذلك المتانة عند درجات الحرارة العالية.

- انخفاض مقاومته للصدأ في الأوساط المختلفة.

- ارتفاع معامل التمدد الحراري.

- انخفاض الخواص التكنولوجية الكهربائية للفولاذ.

- ارتفاع وزن الأجزاء الذي ينعكس على ثمنها.

- صعوبة التصميم الناتجة على المتانة المخفضة.

ب - الفولاذ السبائكي: يسمى الفولاذ سبائكياً عندما يدخل في تركيبه

إضافة إلى عناصره الأساسية عناصر سبائكية رئيسية مثل: الكروم (Cr)

والفاناديوم (V) والكوبالت (Co) والتنجستين (W) والموليبدنيوم (Mo)

والنيكل (Ni) والسليكون (Si) والمنغنيز (Mn) ... وغيرها.

وتحدد العناصر السبائكية التي تدخل في تركيب الفولاذ الخواص الأساسية له

فمثلاً يسمى الفولاذ بالفولاذ الكرومي أو بالفولاذ النيكلي.. إلخ وذلك نسبة إلى العنصر الأساسي السبائكي فيه. وبإضافة العناصر السبائكية المذكورة أعلاه إلى الفولاذ ترتفع قيمة الخواص الميكانيكية والتكنولوجية للفولاذ نتيجة لتأثير العناصر هذه الفعال إذ تمتاز الأجزاء المصنوعة من الفولاذ السبائكي بقساوة ومقاومة كبيرتين للتآكل الكيميائي مما يجعلها أطول عمراً من غيرها، كما أنها تحافظ على قساوتها وتصمد أمام قوى القطع حتى 400 م° وتسمع باستخدام سرعات قطع أكبر عند التشغيل للعدد القاطعة. ويحتوي الفولاذ السبائكي على عناصر سبائكية محددة تسمح لنا بالحصول على تركيب ذو خواص ميكانيكية وكيميائية وفيزيائية محددة ولذلك تلعب الناحية الاقتصادية دوراً رئيسياً عند اختبار الفولاذ السبائكي.

#### 8-3-5 تأثير عناصر الخلط السبائكية على خواص الفولاذ:

\* الكروم (Cr): يدخل في الفولاذ على شكل خليط سبائكي وتصل نسبته إلى % (1.5-2.5) وينتج كذلك فولاذ سبائكي خاص يحتوي على نسبة من الكروم تصل إلى 30% ويعمل الكروم على رفع القساوة ومقاومة التآكل الكيميائي لكنه يخفض قليلاً قابليته للتصفيح والفولاذ الذي يحتوي على نسبة محددة من الكروم يؤمن له مقاومة للتآكسد وصفات مغناطيسية جيدة.

\* النيكل (Ni): يكسب النيكل الفولاذ مقاومة للتآكل الكيميائي وصلابة وقابلية مرتفعة للتشكيل ويزيد المقاومة الصدمية ويرفع من كثافة الفولاذ.

\* التنغستين (W): يكون التنغستين في الفولاذ اتحاداً كيميائياً صلباً للغاية على شكل كربيدات تعمل على رفع قساوة وصمود الفولاذ ويعتبر التنغستين عائقاً أمام نمو حبيبات الأوستنيت عند التسخين ويضمن استبعاد القساوة (الهشاشة) عند التلدين لكن هذا العنصر نادر وغالي الثمن.

\* الفاناديوم (V): يعمل على رفع القساوة وبإضافته نحصل على حبيبات ناعمة.

\* السليكون (Si): عندما يضاف بنسبة (1%) إلى الفولاذ يؤثر بشكل ملحوظ على خواص الفولاذ وبإضافة % (1-1.5) يرفع من القساوة لكن المعدن تحافظ على قيمتها وفي حالة إضافية نسب عالية من السليكون ترتفع المقاومة الكهربائية والنفذية المغناطيسية وترتفع المرونة.

\* المنغنيز (Mn): عندما يضاف إلى الفولاذ بنسبة أكثر من (1%) ترتفع القساوة وصموده ضد الأحمال الصدمية دون أن تؤثر على قدرة التشكيل.

\* الكوبالت (Co): يعمل على رفع المقاومة الحرارية كما ويحسن من الخواص المغناطيسية ويرفع من مقاومة الفولاذ للصدمات.

\* الموليبدنيوم (Mo): يحسن المرونة ويرفع من عامل الصلابة عند التمدد ويصبح الفولاذ مقاوماً للصدأ والتششير عند درجات الحرارة العالية.

\* التيتانيوم (Ti): يرفع من صلابة وكثافة الفولاذ ويعمل للحصول على الحبيبات الناعمة ويحسن إمكانية التشغيل ومقاومة الصدأ.

\* الألومنيوم (Al): يرفع من قدرة المعدن على مقاومة التقشر.

\* النحاس (Cu): يحسن من مقاومة الفولاذ للصدأ ويضاف النحاس بشكل رئيسي في فولاذ البناء.

### 8-3-6 تصنيف وترميز الفولاذ السبائكي:

يصنف الفولاذ بحسن استخداماته إلى ثلاث مجموعات هي فولاذ الإنشاءات وذلك لصناعة الأجزاء الرئيسية والهامة للآلات والمنشآت. وفولاذ العدة وينقسم إلى فولاذ عدة منخفض الخلط وآخر عالي الخلط ويستخدم لصناعة عدد القطع وأجهزة القياس وقوالب الكبس. وفولاذ ذو مواصفات كيميائية وفيزيائية خاصة ويستخدم لصناعة أجزاء ذات استخدامات دقيقة.

## فولاذ العدة السبائكي منخفض الخلط:

تصل نسبة العناصر السبائكية في هذا النوع إلى 5% وتسمح باستخدام سرعات قطع أكبر عند التشغيل بمقارنتها بالعدد المصنوعة من الفولاذ الكربوني وتستخدم في صناعة عدد القص والثقب وبالخرم والاسطمبات وقوالب الصب بالضغط والحقن والكبس وكذلك أجهزة القياس. وتتراوح درجة حرارة التقسية لأنواع فولاذ العدة منخفض الخلط بين 780-850 م° أما درجة حرارة الحداة فتتراوح بين 909 و 1100 م° مع ملاحظة أن لكل شركة صانعة تعليمات خاصة بمواد صنعها يجب مراعاتها عند استخدام تلك المنتجات ومن أمثلتها:

I — فولاذ العدة: WCrMn64 10 خواصه: يمتاز بصمود لقوة القطع. واستخداماته: لصناعة المثاقب (أدوات القطع بالثقب) وعدد قطع البراغي وعدد القص.

II — فولاذ العدة: 120W4 مواصفاته: صموده لقوة القطع. واستخداماته: في صناعة ريش الثقب وذكور القلاووظ وريس التخویش وما شابهها من عدد القطع.

III — فولاذ العدة: x210 CrW12 خواصه: صموده لقوى القطع الكبيرة واستخداماته: في صناعة العدد القاطعة وأدوات التخریم بسمكات كبيرة نوعاً ما وفي صناعة السماحل وعدد فتح المجاري أو أخاديد الخوابير، وتصل قساوته حتى 100 م° إلى (63) روكويل بمراجعة حتى 200 م° مع استخدام الزيت كوسيط للتبريد أو تيار من الهواء.

IV — فولاذ العدة: 145WV13 استخداماته: في صناعة عدد تشغيل العنفات ذات الأسنان الدقيقة تصل قساوته إلى (67) روكويل.

V — فولاذ العدة: 90MnCrVg مواصفاته: يحافظ على مقاساته بعد عملية التقسية (يتشوه قليلاً بالتقسية وبالتالي ينتج مشغولات متقاربة في أبعادها).

واستخداماته: في صناعة عدد القص (سكاكين القص الصغيرة) والتشكيل وأجهزة القياس والمساحل وعدد تشكيل الأسنان.

وتعتبر الأنواع المذكورة سابقاً من فئة فولاذ العدة للتشكيل على البارد أما أنواع فولاذ العدة للتشكيل على الساخن فمن أمثلتها:

I - فولاذ العدة: 45CrMoV6 مواصفاته: قساوته 50-40 HRC ركوبل التي يمكن أن تحتفظ بها حتى (500) م°. واستخداماته: في صناعة عدد التشكيل للحدادة واسطميات الكبس ويشابهه النوعين 55NiCrMoV6 والنوع 56NiCrMoV7

II - وفولاذ العدة: 90MnSi8 مواصفاته: قابل للتلميع ضئيل التشوه بالتقسية. واستخداماته: في صنع قوالب الصب بالضغط والصب بالحقن التي تشكل بالقطع.

#### فولاذ العدة عالي الخلط:

يدخل في هذه الفئة جميع أنواع فولاذ السرعات العالية (فولاذ القطع السريع H.S.S) التي تصنع منها أدوات القطع بالإضافة إلى فولاذ التشغيل على الساخن المستخدمة لقوالب الحدادة واسطميات الكبس كذلك أنواع الفولاذ عديمة التشوه بالتقسية المستخدمة لعدد القص والتشكيل بالكبس. تتراوح درجة حرارة التقسية لهذه الأنواع بين 902 و 1320 م° ودرجة حرارة المراجعة من 100 و 670 م°. وبالمقارنة مع فولاذ العدة منخفض الخلط نجد أنه يمكن أن تتحمل أنواع فولاذ عالي الخلط (القطع السريع) من الأنواع S18-1-12-5 الموافق x80WCOCr185 سرعة القطع أكبر بكثير.

أما فولاذ التشغيل على الساخن (x30WCrCOV92) فيصلح لأسطميات الكبس المعرضة لاجهادات عالية عند تشكيل السبائك غير القابلة للكبس بسهولة ويتم تقسيته في درجة 1160 م° ومراجعته بدرجة (630-670) م° وتتراوح



قساوته بين 51 و 42 ركوبل ويتصف فولاذ العدة (x210CrW121) بمحافظته على أبعاده عند عملية التقسية ولذلك يستخدم للقوالب التي تستخدم في قطع ألواح المحولات ولأجزاء الدقيقة التسامح وتتراوح درجة حرارة التقسية له بين 920 و 980 م° ودرجة حرارة المراجعة بين 100، 350 ويمتاز أيضاً بالمقاومة الجيدة للتآكل الاحتكاكي ولقوة القطع.

#### فولاذ الاستعمال الخاص:

تصنع أجهزة تحميم البخار والمراجل البخارية وكذلك ريش العنفات البخارية والغازية وصمامات العادم لمحركات الاحتراق الداخلي من أنواع الفولاذ المقاومة للحرارة إذ تحتفظ بخواص المتانة حتى 600 م° وتقاوم تكون القشور الأكسيدية حتى 800 م°.

أما أنواع الفولاذ المستخدمة في الصناعات الكيماوية والأغذية والحلويات فتصنع من تلك التي تصمد أمام الصدأ ولذلك تؤخذ من أنواع فولاذ عديم الصدأ (x3CrNi1810) و (x10CrNiMoTi) أما النوع (x8CrNi1221) فيتمتع بقابلية جيدة للسحب العميق والتلميع وغير قابل للمغنطة ولذلك تصنع منه أغلفة الساعات والبوصلات وأدوات المائدة والزخرفة. كما يشترك بعضها في خاصية تحمل درجات الحرارة إلى جانب عدم قابليتها للمغنطة كالنوع x12MnCr1812. أما النوع x10CrAl24 فيستخدم في صنع ألواح التوصيل لمراجل البخار المحمص لتحمله الحرارة والنوع x12CrNi2521 يستخدم في تصنيع أجزاء الأفران الصناعية أو مراجل البخار في مصانع تكرير النفط.

#### الفولاذ ذو الخواص الحرارية:

يستخدم هذا النوع في صناعة الأجهزة الدقيقة وعندما يكون المطلوب أن يكون معامل التمدد الطولي محدداً أو عندما يتطلب الأمر أن يكون التمدد قليلاً للغاية في الناحية العملية. ويصنف هذا النوع ضمن الأنواع الخاصة، ومن

أنواعه الفولاذ (H36) الذي يحتوي على 36% نيكل ويستخدم في صناعة الأجهزة الضوئية وغيرها التي تعمل في ظروف حرارية  $0-100^{\circ}\text{C}$ .

#### فولاذ المحاليل:

تنتمي إلى هذه المجموعة أنواع الفولاذ عالية السبائك والفولاذ المقاوم للصدأ والمقاوم للحرارة وتبعاً للمواصفات الأساسية لفولاذ المحاليل تقسم هذه الأنواع إلى ثلاث مجموعات:

الأولى: الفولاذ المقاوم للصدأ ويتصف بمقاومته للصدأ الكيميائي والكهربائي والطبيعي والحمض والقلويات.

الثانية: الفولاذ المقاوم للحرارة وتمتلك مثل هذه الأنواع مقاومة كبيرة ضد التآكل الكيميائي للسطح في الأوساط الغازية عند درجة حرارة تصل إلى  $500^{\circ}\text{C}$  وعند عمل الأجزاء في ظروف التحميل الكبيرة والمغيرة،

الثالثة: الفولاذ ذو المتانة العالية وتعمل أنواعه في حالة التحميل في فترات زمنية محددة.

#### 7-3-8 ألواح الصاج:

تصنف بحسب سمك المقطع، دقيقة المقطع أقل من (3) مم ومتوسطة من (3-40) mm وسميكة أكبر من (40-75). وتصنع الألواح غالباً من فولاذ الإنشاءات كما أنها تصنع من فولاذ المقسى سطحياً بالتغليف أو فولاذ المراجعة أو فولاذ عديم الصدأ. أما الألواح متناهية الدقة والألواح البيضاء (أقل من 0.5 مم) فتصنع من الفولاذ الكربوني اللدن وتزال طبقة الشحوم من على الألواح الدقيقة مما يجعلها صالحة للطلاء بالدهان والطباعة وتجهز كسوة الألواح البيضاء القصديرية بالصهر وبالتحليل الكهربائي.

يرمز لقساوة الألواح الدقيقة بالحروف D.C.B.A بحيث يدل الحرف A على أقل قساوة وعلى أكبرها كما يرمز لمظهر السطح الخارجي بالحرف W مع

تحديد درجة الجودة بالأرقام W1 أولاً وW2 ثانياً... إلخ. كما يضاف إلى الألواح البيضاء رموز تدل على نوع التغطية وسمك طبقة التغطية القصديرية فمثلاً يعني الرمز AF-24-W2 أن:

AF لوحاً أبيضاً بقساوة من رتبة A وكسوة قصديرية (قصرة بالذهب)

42 مقدار سمك التغطية 24 غ/مم

W2 مظهراً سطحياً من النوع الثاني

كما تصنف حسب رتب الجودة على الشكل التالي:

Sr 10 جودة أساسية

Sr 12 جودة السحب.

Sr 13 جودة السحب العميق.

Sr 14 جودة السحب العميق الخاصة.

ويحدد اختبار أريكون ( اختبار السحب ) قابلية الألواح للسحب العميق ويقضي هذا الاختبار بالتأثير على سطح العينة بواسطة سنك مكور النهاية بسرعة تأثير تتراوح بين 20.5 مم/د ويعتبر حتى يتمزق اللوح في مكان التأثير ويعتبر عمق التغلغل للسنبلة بالمم في لحظة تمزق اللوح مقياساً لهذا الاختبار أما أنواعاً السطوح فتصنف كالتالي:

0.1 ويدل ذلك على أن الألواح مخمرة في الصناديق بدون إزالة قشور

الأكاسيد

0.2 ويدل ذلك على أن الألواح مجهزة بمعالجة حرارية بدون إزالة

قشور الأكاسيد.

0.3 ويدل ذلك على أن الألواح بدون قشور أكسيدية.

0.4 ويدل ذلك على أن الألواح بأسطح محسنة.

0.5 يدل ذلك على أن الألواح بأسطح ممتازة.

ويرمز لمظهر السطح بالأحرف فيدل الحرف (g) على أن السطح صقيل و(m) أنه معتم و(r) وأنه خشن.

كما تصنف الألواح حسب نوع الصهر ونوع الصب كما يلي:

T Sr10 0.1 ويعني أنه صاج دقيق صهر في فرن توماس برتبة جودة

أساسية وأكسدة السطح غير مزالة.

T تعني أن الصهر بواسطة فرن توماس.

Sr 10 جودة أساسية

0.1 قشور الأكسيد غير مزالة

WuS 123r ويعني أنه صاج دقيق من الفولاذ المصبوب بدون تخمير

برتبة جودة السحب وأكسدة السطح مزالة وسطحه خشن.

RST 1304g ويعني أنه صاج دقيق من الفولاذ مصبوب بتخمير برتبة

جودة السحب العميق وسطحه صقيل ومحسن.

RFSr 1405m ويعني أنه صاج دقيق من فولاذ مصبوب بتخمير خاص

برتبة جودة السحب العميق الخاصة وسطحه ممتاز معتم.

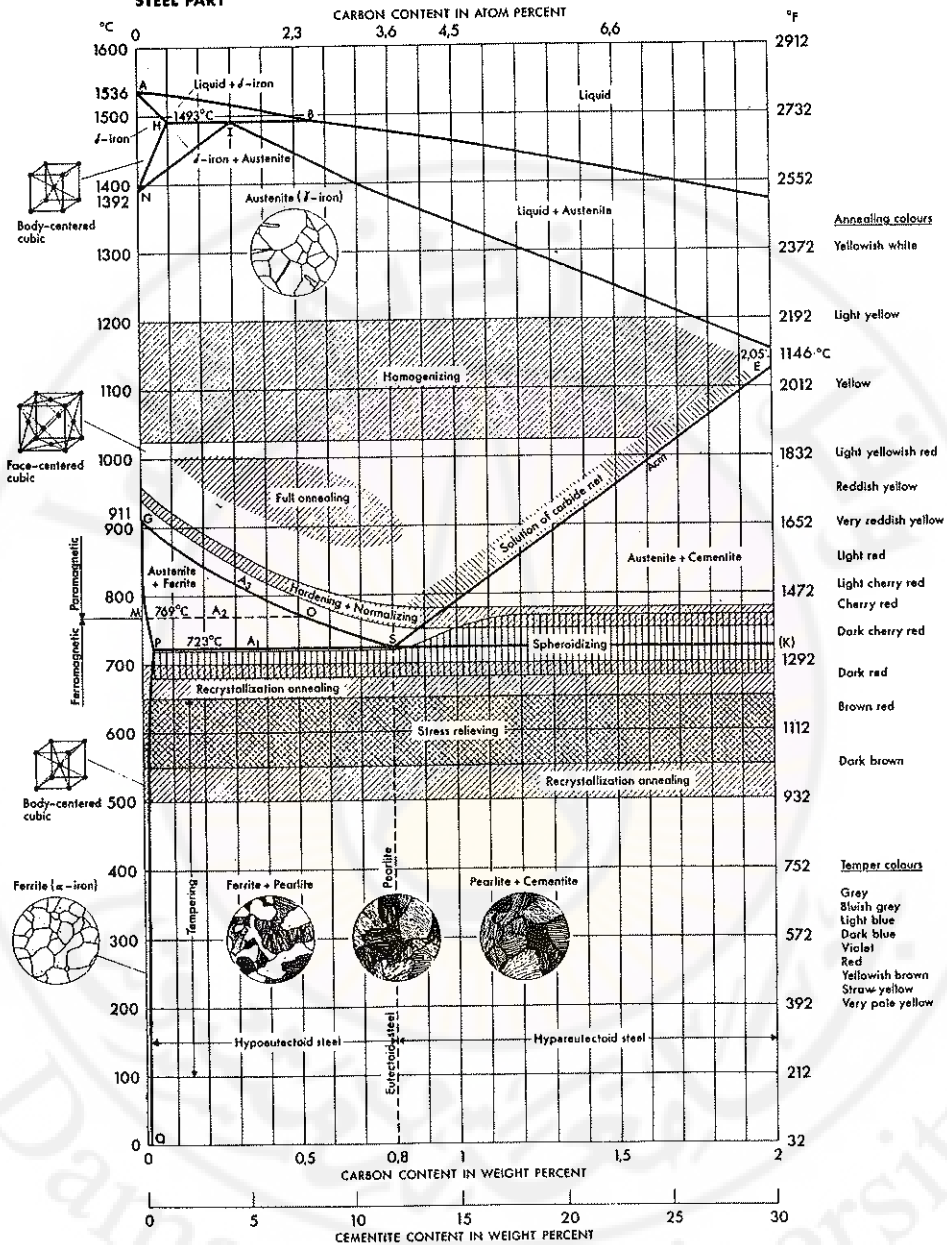
وتعتبر مقاومة الشد عاملاً حاسماً في تسمية الصاج الدقيق مثال:

PSr37-203 ويعني أنه صاج دقيق من فولاذ مصبوب بتخمير من

مجموعة الجودة (2) بمقاومة شد تساوي 37Kg/mm<sup>2</sup> وأكسدة السطح مزالة.

# IRON-CARBON EQUILIBRIUM DIAGRAM

STEEL PART





## الفصل التاسع

### المعادن غير الحديدية

1.9 الألمنيوم وسبائكه

1.1.9 سبائك الألمنيوم

2.1.9 المعالجات الحرارية لسبائك الألمنيوم

2.9 النحاس وسبائكه

1.2.9 سبائك النحاس

2.2.9 المعالجات الحرارية لسبائك النحاس

3.9 النيكل وسبائكه

4.9 التيتانيوم وسبائكه

5.9 المنغنسيوم وسبائكه

6.9 المعادن صعبة الانصهار





## الخلاط اللاحديدية

### Non-iron alloys

#### 9-1 الألومنيوم وسبائك

الألومنيوم معدن أبيض فضي اللون ينصهر عند الدرجة  $658^{\circ}\text{C}$  والهيكل الشبكي للألومنيوم عبارة عن مكعب متمركز وجيهاً (F.C.C) طول ضلعه  $a = 4.0412 \text{ \AA}$ . وتبلغ كثافة الألومنيوم  $2.7 \text{ g/cm}^3$ . ويتميز الألومنيوم بمقاومة مرتفعة للصدأ وذلك نتيجة لتكوين طبقة متينة ورقيقة من أكسيد الألومنيوم  $\text{Al}_2\text{O}_3$  على سطحه. وتزداد مقاومة الألومنيوم للصدأ بزيادة نقاوته. يتمتع الألومنيوم المرتفع النقاوة بعد تدينه بالخواص الميكانيكية التالية: مقاومة الشد  $5 \text{ kg/mm}^2$ ، إجهاد الخضوع  $\sigma_{0.2} = 1.5 \text{ kg/mm}^2$  الاستطالة 50%، أما الألومنيوم التجاري فيتمتع بالخواص التالية: مقاومة الشد  $8 \text{ kg/mm}^2$ ،  $\sigma_{0.2} = 3$ ، الاستطالة 35%.

#### 9-1-1 تصنيف خلاط الألومنيوم:

تستخدم خلاط الألومنيوم على نطاق واسع ويمكن تصنيف العناصر التي تدخل في سبائك الألومنيوم إلى ثلاثة فئات:

- 1 — عناصر رئيسية: السيلكون والنحاس والمغنيزيوم والتوتياء. وتؤثر هذه العناصر تأثيراً كبيراً في تحسين خواص الألومنيوم الميكانيكية.
- 2 — عناصر ثانوية: المغنيز والنيكل والكوبالت والكروم والحديد، وهذه العناصر تأثيرها أقل من سابقتها على الخواص الميكانيكية واستعمالاتها أقل بكثير.

3 — عناصر تحسين النوعية: التوتياء والسيريوم والصوديوم وتضاف هذه العناصر عادة بكميات قليلة ولكنها مع العناصر الرئيسية تحسن كثيراً من الخواص الميكانيكية.

إن أكثر خلائط الألمنيوم انتشاراً هي النظم التالية:

ألمنيوم — نحاس.

ألمنيوم — سيليكون.

ألمنيوم — مغنيزيوم.

ألمنيوم — مغنيزيوم — نحاس.

ألمنيوم — مغنيزيوم — سيليكون.

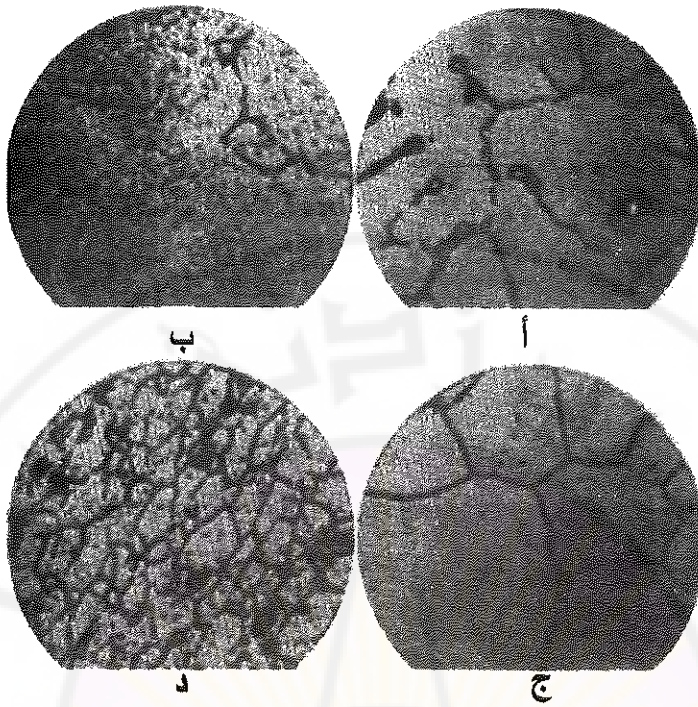
ألمنيوم — نحاس — مغنيزيوم — سيليكون.

ألمنيوم — زنك — مغنيزيوم — نحاس.

وتكون هذه السبائك في حالتها المتزنة عبارة عن محلول صلب سبائكي وأطوار معدنية بينيه مثل الأطوار  $\text{CuAl}_2$  (الطور  $\theta$ )،  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ،  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  (الطور  $s$ )  $\text{Al}_6\text{CuMg}_4$  (الطور  $T$ )،  $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Al}_3\text{Mg}_2$  وغيرها وهذا موضح في الشكل 9-1.

تصنف جميع خلائط الألمنيوم إلى ثلاث مجموعات:

- 1 — خلائط الألمنيوم القابلة للتشكيل، وتخصص لإنتاج المنتجات نصف مصنعة والمطروقات، ويتم التشكيل بواسطة الدرفلة والبثق والطرق والسحب العميق. وتقسم السبائك القابلة للتشكيل حسب قابليتها للتمتين إلى سبائك لا يمكن تمتينها بالمعالجة الحرارية وأخرى يمكن تمتينها بالمعالجة الحرارية.
- 2 — خلائط السباكة، وتخصص لصناعة المسبوكات المعقدة الشكل.
- 3 — الخلائط المنتجة بطريقة ميتالورجيا المساحيق.



الشكل 1-9

- بنية خليطة الألمنيوم الديورالومين D16.
- أ — بعد السباكة ( $\text{CuAl}_2 + \alpha$  + الطور s).
- ب — بعد المجانسة.
- ج — بعد التقسية (المحلول الصلب  $\alpha$ ).
- د — بعد التقسية والتعتيق الطبيعي.

خلائط الألمنيوم الخاصة بالسباكة:

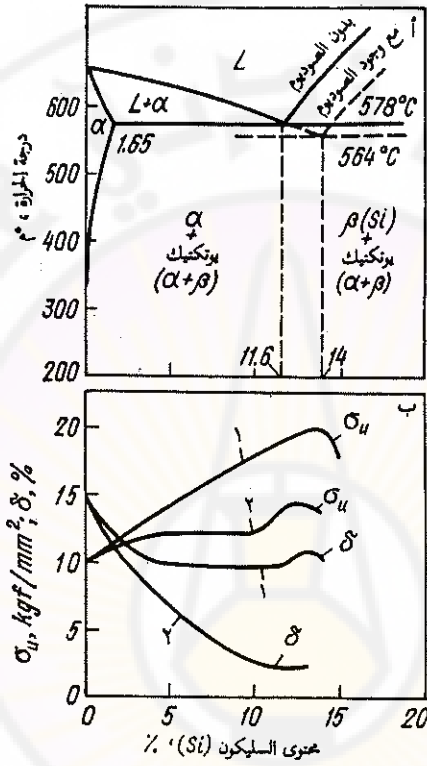
يجب أن تتميز الخلائط المستخدمة في صناعة المسبوكات المعقدة الشكل بسيولة عالية وبانكماش قليل نسبياً أثناء التجمد وبخواص ميكانيكية جيدة.

وتستخدم على نطاق واسع في سبائك خلائط من نظام: ألومنيوم – سيليكون – ألومنيوم – نحاس – ألومنيوم – مغنيزيوم. ولتصغير حجم الحبيبات وبالتالي لتحسين الخواص الميكانيكية تضاف إلى الخلائط عناصر معدلة مثل التيتانيوم والزركونيوم.

إن أكثر الخلائط انتشاراً هي خليطة ألومنيوم – سيليكون المعروفة بالسيلومين Silumins ، وتعتبر الخليطة المحتوية على  $10 \div 13\% \text{Si}$  (الشكل 9-2) من الخلائط النمطية، وتتميز هذه الخليطة بخواص سبائك جيدة وبالانصهار عند درجة حرارة منخفضة وبسهولة مرتفعة وبانكماش قليل عند التجمد. ويمكن زيادة متانة الخليطة بإجراء عملية التعديل وذلك بإضافة  $0.01\%$  صوديوم (مكون من  $2/3$  فلوريد الصوديوم NaF و  $1/2$  كلوريد الصوديوم NaCl) إلى الخليطة المنصهرة وبقدر  $2\%$  من حجم الخليطة المنصهرة. وقبل إجراء عملية التعديل تتكون الخليطة المحتوية على  $12 \div 13\%$  سيليكون من يوتكتيك ومن بلورات الطور  $\beta$  الأولية، وتكون بنية اليوتكتيك إبرية ضخمة (الشكل 9-3-أ). أما بعد إجراء عملية التعديل فيصبح اليوتكتيك دقيق الحبيبات، كما تتحول الخلائط بعد اليوتكتيك من حيث البنية إلى خلائط قبل يوتكتيكية توجد بها بلورات شجرية أولية للمحلول  $\alpha$  (الشكل 9-3-ب). وترتبط ظاهرة التعديل بظاهرة فرط التبريد وبزيادة محتوى السيليكون في اليوتكتيك من  $11.6\%$  إلى  $14\%$  سيليكون. تقاوم خلائط الألومنيوم مع السيليكون الصدأ بشكل جيد في الأوساط الجوية الرطبة وفي ماء البحر كما أنها تشكل بالقطع وتلحم باللحام الغازي وبالقوس الكهربائي.

تستخدم الخلائط التي تحتوي على الأطوار  $\text{Al}_3(\text{Cu.Ni})_{2.9}\text{Al}_6\text{Cu}_5\text{Ni}$  وغيرها كأطوار ممتدة للأجزاء المسبوكة التي تعمل لفترات زمنية طويلة عند درجة حرارة  $275 \div 320^\circ \text{C}$  (الكامات

ورؤوس الاسطوانات وأجزاء المحركات النفائثة). فهذه الأطوار تتميز بقلّة ميلها للتضخم وتعطي أطوار متفرعة صغيرة. وتتمتع هذه الخلط بخواص سبابة مقبولة وبقدرة جيدة على اللحام والتشكيل بالضغط.



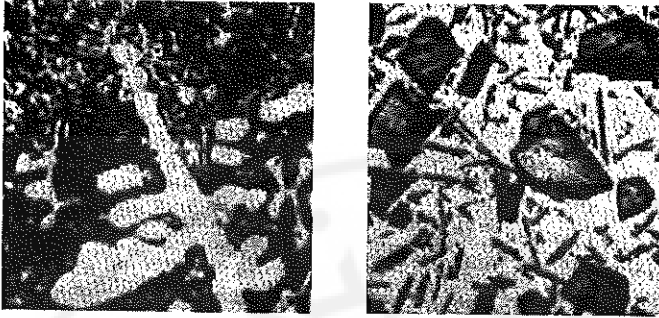
الشكل 2-9

خلائط الألمنيوم - سليكون.

أ - مخطط توازن Al-Si.

ب - تأثير نسبة السليكون على الخواص الميكانيكية للخليطة

(1 - معدل، 2 - بدون تعديل)



ب

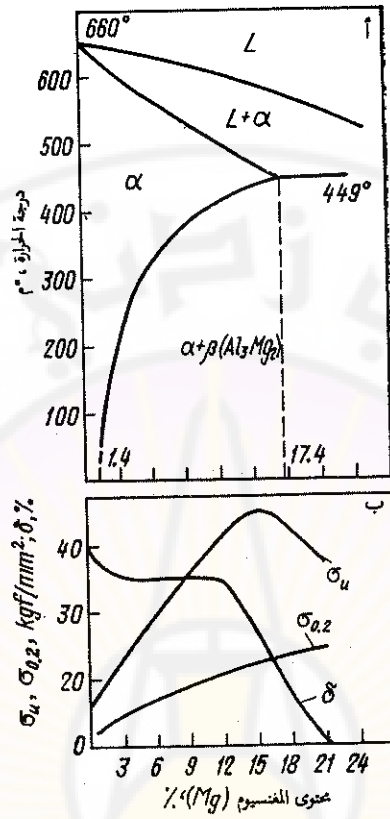
أ

الشكل 3-9

البنية البلورية لخليطة السيلومين (تكبير X 250).

أ - قبل التعديل. ب - بعد التعديل.

خلاط الألمنيوم القابلة للتشكيل والتي لا تتم بالمعالجة الحرارية: تنتمي إلى هذه الخلائط، خلاط الألمنيوم مع المغنيز أو المغنيزيوم. وتمتد هذه الخلائط (الشكل 4-9) في هذه الحالة يحدث نتيجة لتكوين المحلول الصلب وكذلك لوجود الأطوار غير الذائبة. وتتكون خلاط الألمنيوم - مغنيز ومحلول صلب للمغنيز في الألمنيوم، ويوجد في هذا المحلول أيضاً كمية غير كبيرة من دقائق المركب  $Al_6Mn$  أما خليطة ألنيوم - مغنيزيوم ( $Al - Mg$ ) فلا تحتوي على أطوار إضافية وتتكون فقط من المحلول الصلب  $\alpha$  حتى بعد التبريد البطيء ولا تعطي تقسية وتعتيق الخليطتين أثراً كبيراً.



الشكل 4-9

خلائط ألومنيوم - مغنيزيوم.

أ - مخطط التوازن.

ب - العلاقة بين تغير الخواص الميكانيكية للألمنيوم ومحتوى المغنيزيوم.



وتشكل هذه الخلائط بالضغط بسهولة كما أنها تلحم بشكل جيد باللحام التلامسي وبالقوس الكهربائي مع الحماية بغاز الأرجون. كما أنها تتميز بارتفاع مقاومتها للصدأ، وتستخدم هذه الخلائط لصناعة عناصر الإنشاءات المعرضة لأحمال غير كبيرة والتي تتطلب مقاومة مرتفعة ضد الصدأ.

**خلائط الألمنيوم القابلة للتشكيل والتمتين بالمعالجة الحرارية:**

**خلائط الديورالومين:**

تسمى خلائط الألمنيوم مع النحاس والمغنيزيوم التي يضاف إليها المغنيز بالديورالومين، ويؤدي المغنيز إلى زيادة مقاومة الديورالومين للصدأ، ويقلل الحديد متانة ولدونة الديورالومين لتكوين المركب  $(Mn.Fe)Al_6$ ، الذي يتبلور على هيئة شرائح كبيرة الحجم. وبالإضافة إلى ذلك يكون الحديد المركب  $Al_7Cu_2Fe$ ، الذي لا يذوب في الألمنيوم، وبارتباط الحديد مع النحاس في هذا المركب يقلل الحديد من أثر زيادة المتانة أثناء التعتيق لهذا يجب ألا يزيد محتوى الحديد في هذه الخلائط عن  $0.5 \div 0.7\%$ . أما السليكون فيكون في هذه الخلائط الطورين  $Mg_2Si$  و  $(Al_xMg_5Cu_5Si_4)$ . اللذان يذوبان في الألمنيوم ويؤديان عند التعتيق التالي إلى بعض الزيادة في متانة السبيكة (الخليطة).

تقسى هذه الخلائط بالتسخين حتى  $510 \div 495^\circ C$  ويؤدي التسخين إلى درجات حرارة أعلى إلى حرق الخليطة (Overbarring)، أي إلى الأكسدة والانصهار الجزئي في المعدن على الحدود بين الحبيبات الأمر الذي يقلل بشدة لدونه الخليطة. وتتعرض خلائط الديورالومين بعد تقسيبها للتعتيق الطبيعي الذي يحدث بأقصى شدة خلال اليوم الأول بعد التقسية وينتهي عملياً خلال أربعة أو خمسة أيام وانخفاض درجة الحرارة يؤخر التعتيق أما ارتفاعها فيزيد من سرعة عملية التعتيق.



تستخدم خلائط الديورالومين لإعداد أجزاء وعناصر الإنشاءات المتوسطة والمرتفعة المتانة والتي لا يتطلب فيها مقاومة مرتفعة ضد الصدأ. وكذلك لصناعة ألواح التغطية والإطارات والضلوع الطولية والقضبان الجانبية للطائرات.

#### خلائط الألمنيوم المرتفعة المتانة:

تصل متانة هذه الخلائط إلى  $55 \div 70 \text{ kg/mm}^2$  وتحتوي على الزنك بالإضافة إلى النحاس والمغنيزيوم والأطوار الممتنة في هذه الخلائط هي  $\text{MgZn}_2$  الطور T-  $(\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3)$  والطور S-  $(\text{Al}_2\text{CuMg})$ . وتؤدي إضافة المغنيز والكروم إلى تحسين مقاومة الصدأ. وتقسى هذه الخلائط عند  $475 \div 465$  (مع التبريد في ماء بارد أو ساخن) ثم تعرض لتعتيق الاصطناعي عند الدرجة  $145 \div 135$  لمدة 16 ساعة. وبمقارنة هذه الخلائط بالديورالومين نجد أنها أكثر حساسية لأماكن تركيز الإجهادات وبأن مقاومتها للصدأ تحت تأثير الإجهادات أقل، كذلك فإن حد التعب أقل.

#### خلائط الألمنيوم الخاصة بالطرق والتشكيل بالقوالب:

تتميز هذه الخلائط بارتفاع اللدونة عند درجات حرارة الطرق والتشكيل بالقوالب ( $380 \div 450^\circ \text{C}$ ). والأطوار الممتنة عند التعتيق هي المركبات التالية  $\text{Mg}_2\text{Si}$  الطور s- و  $\text{CuAl}_2$  ، الطور W-  $(\text{Al}_x\text{Mg}_5\text{Cu}_5\text{Si}_4)_9$ . تستخدم هذه الخلائط لصناعة الأجزاء المعقدة الشكل والمتوسطة المتانة، وتشكل هذه الخلائط بالطرق والكبس عند درجات حرارة  $450 \div 475$ . وتعرض الخلائط تقسية من درجة حرارة  $505 \div 525$  أو  $495$  مع التبريد في الماء ثم التعتيق عند  $150 \div 165$  لمدة 6 - 15 ساعة.

### الخلاط المقاومة للحرارة:

تستخدم هذه الخلاط للأجزاء التي تعمل عند درجات حرارة تصل إلى  $300^{\circ}\text{C}$  (الكباسات ورؤوس الأسطوانات وريش الضواغط في المحركات السفائية وألواح تغطية المحركات الأسرع من الصوت...). والأطوار الممتنة بخلائط الألمنيوم المقاومة للحرارة هي الأطوار  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ )،  $\text{Mg}_2\text{Si}$  والطور  $\text{S}$  ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) وكذلك  $\text{Al}_9\text{FeNi}$  و  $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$  وتتفصل هذه الأطوار على هيئة دقائق صغيرة عند التفكك الجزئي للمحلول، وتقاوم هذه الدقائق عملية التضخم عند ارتفاع درجة الحرارة. تقسى هذه السبائك من الدرجة  $510^{\circ}\text{C} \div 535^{\circ}\text{C}$  في الماء وتتعرض للتعتيق عند درجة حرارة  $165^{\circ}\text{C} \div 175$  للحصول على خواص ميكانيكية جيدة عند درجة حرارة الغرفة.

### خلاط الألمنيوم الملبدة:

يتم الحصول على خلاط الألمنيوم الملبدة بضغط مساحيق من خلاط الألمنيوم بقوالب ثم تلبيدها. تتمتع خلاط الألمنيوم الملبدة المصنوعة من مساحيق خلاط الألمنيوم، عند درجة حرارة الغرفة بنفس الخواص الميكانيكية المميزة لهذه السبائك بعد السباكة والتشكيل. أما عند درجة حرارة  $350^{\circ}\text{C} \div 400$  فتتمتع خلاط الألمنيوم الملبدة بخواص ميكانيكية أعلى وكثيراً ما تستخدم خلاط الألمنيوم الملبدة في تلك الحالات التي لا يكون ممكناً فيها الحصول على خلاط بالسباكة أو بالتشكيل بالضغط.

### 3-1-9 المعالجة الحرارية للخلاتط الألمنيوم:

تستخدم التقسية والتعتيق لثمتين خلاتط الألمنيوم.

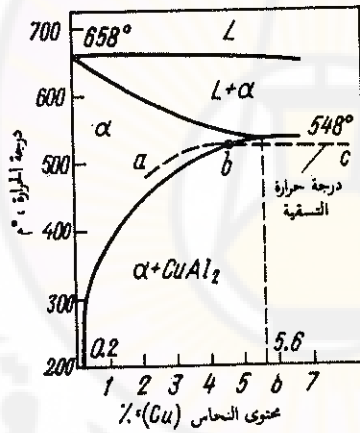
#### تقسية خلاتط الألمنيوم:

تتلخص هذه العملية في تسخين الخليطة حتى درجة حرارة تذوب عندها الأطوار المعدنية البينية غير الذائبة ذوباناً كاملاً أو شبه كامل في الألمنيوم ثم الإبقاء عند هذه الدرجة والتبريد السريع بعد ذلك حتى درجة حرارة الغرفة للحصول على محلول صلب مفرط التشبيع. فمثلاً: يتم تحديد درجة حرارة تقسية خلاتط ألمنيوم — نحاس (الشكل 9-5) بواسطة الخط abc الذي يمر فوق خط الحد الأقصى للذوبانية بالنسبة للسبائك المحتوية على أقل من 5.6% نحاس، ويمر تحت خط اليوتكتيك للخلاتط المحتوية على كمية أكبر من النحاس وعند تسخين الخلاتط المحتوية على أقل 5.6% نحاس يذوب الطور الفائض  $CuAl_2$  ذوباناً كاملاً وعند التبريد نحصل فقط على المحلول الصلب  $\alpha$  المفرط التشبيع الذي يحتوي على كامل النحاس الموجود في الخليطة. وعندما تزيد كمية النحاس عن 5.6% تتكون بنية الخليطة من المحلول الصلب المفرط التشبيع  $\alpha$  الذي يناظر تركيبة النقطة b ومن بلورات المركب  $CuAl_2$  التي لم تذوب أثناء التسخين والتي تدخل في تركيب اليوتكتيك. ويعتمد زمن الإبقاء عند درجة حرارة التقسية على حالة بنية الخليطة وعلى نوع الفرن وسمك المنتج. تجرى عملية تعتيق بعد التقسية.

#### تعتيق خلاتط الألمنيوم:

يتم تعتيق خلاتط الألمنيوم في إبقاء الخلاتط عند درجة حرارة الغرفة لعدة أيام (التعتيق الطبيعي) أو لمدة 10-24 ساعة عند درجة حرارة مرتفعة (تعتيق اصطناعي). وفي أثناء عملية التعتيق يتفكك المحلول الصلب مما يؤدي إلى زيادة متانة الخليطة.

عند تعتيق خلأط أأمنوم — نحاس يحدأ تفكك المحلول الصلب (الذي تتوزع ذرات النحاس في نسقه البلوري توزيعاً منتظماً) على عدة مراحل تبعاً لدرجة حرارة وزمن التعتيق. فعند التعتيق الطبيعي (20° C) أو الاصطناعي في درجة حرارة منخفضة (أقل من 100° C ÷ 150) لا يتفكك المحلول الصلب بحيث ينفصل منه طور إضافي بل إن ما يحدث هو إزاحة في ذرات النحاس داخل النسق البلوري. للمحلول الصلب  $\alpha$  لمسافات صغيرة للغاية. وإذا سخنت الخليطة بعد التعتيق الطبيعي لفترة زمنية قصيرة (عدة ثوان أو عدة دقائق) حتى درجة حرارة 230° C ÷ 270 ثم بردت بسرعة ينزل التمتين تماماً وتصبح الخليطة مثلما كانت عليه بعد التقسية مباشرة. وتعرف هذه الظاهرة بالاستعادة (recovery). ينطبق هذا الترتيب العام لتفكك المحلول الصلب المفرط التشبع في خلأط الأأمنوم — نحاس على الخلأط الأأرى.



الشكل 5-9

مخطط توازن لخلأط أأمنوم — نحاس

الخط abc يظهر درجات حرارة تسخين هذه الخلأط (Al-Cu).

من أجل عملية التقسية.

## 9-2 النحاس وسبائكه

### 9-2-1 النحاس:

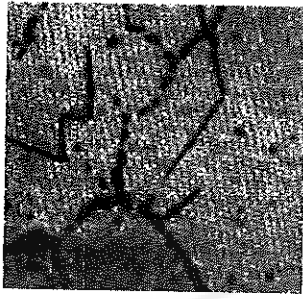
النحاس معدن ثقيل وزنه النوعي  $8.94 \text{ g/cm}^3$  ودرجة انصهاره  $1083^\circ\text{C}$  ويتمتع النحاس بهيكل شبكي متركز وجهاً، ومثانة النحاس غير مرتفعة وإن كانت لدونته مرتفعة مقاومة الشد له  $20-25 \text{ kg/mm}^2$  والاستطاله  $30-35\%$ . يتميز النحاس بناقليه جيدة للحرارة والكهرباء لذلك يستخدم على نطاق واسع في الصناعات الكهربائية. تؤثر الشوائب الموجودة في النحاس تأثيراً شديداً على خواصه ويمكن تقسيم الشوائب إلى المجموعات التالية تبعاً لتأثيرها المتبادل مع النحاس:

1 — شوائب تشكل مع النحاس محاليل صلبة، مثل النيكل والزركونيوم و الأنتيمون... الخ وتؤدي هذه الشوائب إلى تحسين الخواص الميكانيكية للنحاس وتقلل الناقلية الكهربائية والحرارية.

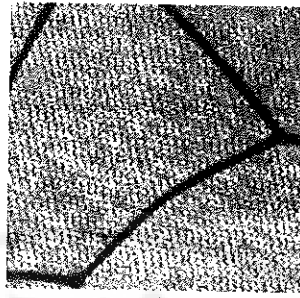
2 — شوائب الرصاص والبرصوت وغيرها، لا تذوب عملياً في النحاس وتشكل مع النحاس أنواع من اليوتكتيك السهل الانصهار متوزع على حدود حبيبات النحاس (الشكل 9-6-ج) مما يجعله هشاً ويقلل من قابليته للتشكيل.

3 — شوائب الأوكسجين والكبريت التي تعطي مع النحاس مركبات كيميائية قصيفة مثل أكسيد النحاس  $\text{Cu}_2\text{O}$  وكبريت النحاس  $\text{Cu}_2\text{S}$  التي تتواجد على الحدود بين حبيبات النحاس (الشكل 9-6).

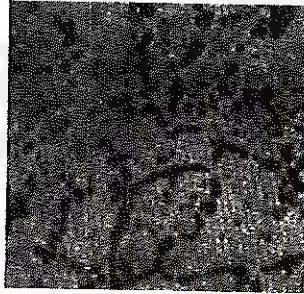
نادرأ ما يستخدم النحاس النقي لإعداد أجزاء الآلات بسبب انخفاض مثانته، وتحسن الخواص الميكانيكية للنحاس عند إضافة الزنك والألمنيوم والسيليكون والبيريليوم، وتستخدم هذه الخلائط على نطاق واسع في الصناعات الهندسية.



أ



ب



ج

الشكل 6-9

البنية المجهرية للنحاس المسبوك

أ- مع وجود شوائب من البزموت 0.2%

ب - 0.3% رصاص

ج - 0.1% كبريت

التكبير 200 ×

## 2-2-9 خلاط النحاس الأصفر

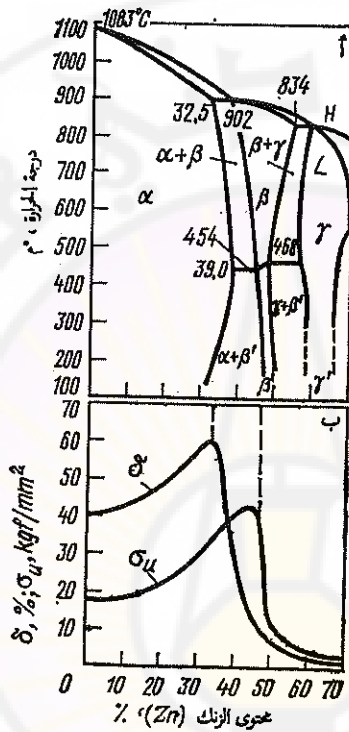
تسمى خلاط النحاس مع الزنك (التوتياء) بالنحاس الأصفر ويوضح مخطط التوازن للنظام نحاس - زنك (الشكل 9-7) أن بيئة النحاس الأصفر الذي لا يزيد محتوى الزنك فيه عن 39% تكون أحادية الطور ومكونة من بللورات المحلول الصلب للزنك. في النحاس (الطور  $\alpha$ ). ويظهر الطور  $\beta$  في الخلاط التي يتراوح محتوى الزنك فيها من 39% إلى 50% وهذا الطور عبارة عن مركب إلكتروني CuZn.

وعند درجات الحرارة المرتفعة يكون الهيكل البلوري للطور  $\beta$  غير مرتب من حيث وضع الذرات فيه ويكون الطور  $\beta$  لدناً. وعند انخفاض درجة الحرارة حتى  $470-453^{\circ}\text{C}$  يصبح وضع ذرات النحاس والزنك في هذا الطور مرتباً ويرمز له بالرمز  $\beta'$  والذي يتمتع بالقساوة والهشاشة.

تؤدي زيادة محتوى الزنك في الطور  $\alpha$  إلى زيادة متانة وقساوة ولدنة النحاس الأصفر (الشكل 9-7 ب) وعند ظهور الطور  $\beta'$  تقل اللدونة بشكل حاد، أما مقاومة الشد فتستمر في الارتفاع لتصل إلى أقصى قيمة لها عندما يصل محتوى الزنك إلى 45%. وتقل متانة النحاس الأصفر بشدة في مجال الطور  $\beta'$ ، ولهذا لا تستخدم هذه الخلاط في الصناعة، وبين الشكل 9-8 البنية المجهرية للنحاس الأصفر المستخدم في الصناعة.

ويتميز النحاس الأصفر الثنائي الطور بمتانة عالية ومقاومة مرتفعة للاهتزاز بالمقارنة بالأحادي الطور وكما تتميز خلاط النحاس  $\alpha$  أحادية الطور بسهولة تشكيلها على البارد. وتحدث تقسية انفعالية بخلائط النحاس الأصفر أثناء التشكيل على البارد فتزداد مقاومة الشد وتقل الاستطالة النسبية وإزالة هذه التقسية الانفعالية يتم إجراء تليدين معيد للتبلور عند  $500 \div 700^{\circ}\text{C}$  والنحاس الأصفر  $(\beta' + \alpha)$  الثنائي الطور يكون منخفض اللدونة على البارد،

ويعرض للتشكيل بالضغط على الساخن عند درجات حرارة مناظرة للمنطقة  $\beta$  أحادية الطور.



الشكل 7-9

أ- مخطط توازن الخلائط نظام نحاس - زنك

ب - الخواص الميكانيكية للنحاس الأصفر المسبوك تبعاً لمحتوى الزنك فيه





أ



ب

الشكل 8-9

البنية المجهرية للنحاس الأصفر التكبير  $\times 100$

أ- الطور  $\alpha$

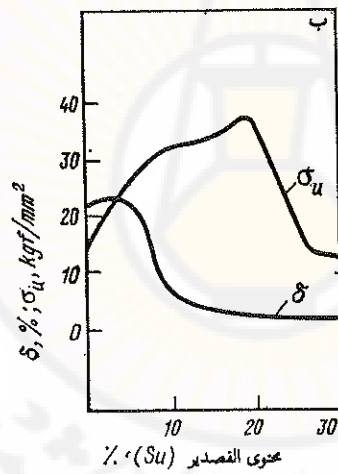
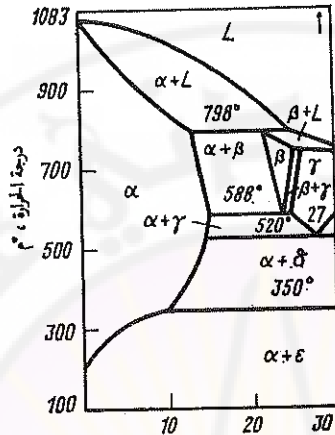
ب- ثنائي الطور  $(\alpha+\beta')$

### النحاس الأصفر الخاص:

تنتمي إلى هذه المجموعة أنواع النحاس الأصفر التي يضاف إليها القصدير والسليكون والمنغنيز والألمنيوم والحديد لتحسين خواصها الكيميائية والميكانيكية. فعندما يصل محتوى القصدير إلى  $0.5\% \div 1.5\%$  تتحسن مقاومة النحاس الأصفر للصدأ. أما إضافة السليكون والمنغنيز والهيكل والألمنيوم فتحسن بشكل ملحوظ مقاومة النحاس الأصفر للصدأ وكذلك خواصه الميكانيكية ومقاومته للاحتكاك، أما الحديد فيؤدي إلى إعاقعة عملية المادة التبلور وتقليل حجم الحبيبات وزيادة القساوة ويصبح النحاس الأصفر متمتعاً بالخواص المغناطيسية.

### 3-2-9 خلائط البرونز القصديري:

وهي عبارة عن خلائط النحاس مع القصدير وبين الشكل 9-9 جزء من مخطط التوازن للنحاس والقصدير. والطور  $\alpha$  عبارة عن محلول صلب للقصدير في النحاس. وفي خلائط هذا النظام تتكون مركبات إلكترونية مثل  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ،  $\text{Cu}_5\text{Zn}$ ، ويوضح مخطط التوازن مجموعة من التحولات البريتكتيكية وتحولان يوتكتويدي. فعند درجة الحرارة  $588^\circ\text{C}$  يحدث تحول يوتكتويدي بالطور  $\beta$  مع تكوين خليط من الطور  $\alpha$ - والطور  $\gamma$  أما عند درجة حرارة  $520^\circ\text{C}$  فتتحول بلورات المحلول الصلب  $\gamma$  إلى المحلول الصلب  $\alpha$  والمركب  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  (الطور  $\epsilon$ ). ويتبلور البرونز القصديري في نطاق واسع من درجات الحرارة ولهذا تكون بنية شجرية عند التبريد السريع (الشكل 9-10 أ). والبرونز المحتوي على أقل من  $5\% \div 4\%$  قصدير يكون عبارة عن محلول صلب  $\alpha$  أي أنه أحادي الطور. وتكون بنية هذا البرونز بعد التشكيل والتلويح عبارة عن حبيبات متعددة الأسطح (الشكل 9-10 ب).



الشكل 9-9

أ- مخطط توازن النحاس - قصدير

ب - الخواص الميكانيكية للبرونز المسبوك تبعاً لمحتوى القصدير



أ



ب

الشكل 9-10

البنية المجهرية للبرونز القصديري التكبير  $\times 250$

أ- بعد السبابة

ب - بعد التشكيل والتلدين

تستخدم في الحالة العملية خلائط البرونز التي لا يزيد محتوى القصدير فيها عن  $12\% \div 10$ . فالبرونز الذي يحتوي على كمية أكبر من القصدير يكون قصيفاً للغاية، وبين الشكل 9-9-ب تغير الخواص الميكانيكية للبرونز المسبوك تبعاً لمحتوى القصدير. فعند زيادة محتوى القصدير حتى  $20\% - 18$  تزداد مقاومة الشد وبعد ذلك تقل بشكل حاد، وتزداد الاستطالة النسبية إلى حد ما عندما يصل محتوى القصدير بالبرونز إلى  $6\% \div 4$ . وتقل الاستطالة النسبية عند تكوين اليوتكتويد.

يتميز البرونز القصديري بقدرة جيدة على السباكة، لهذا فإنه يستخدم لصناعة المسبوكات المعقدة الشكل، وعند إجراء السباكة في الرمل تتكون بنية المسبوكات من حبيبات ضخمة كما توجد مسامية مرتفعة بين الحبيبات. وللتخلص من الحبيبات الضخمة ولتحسين الخواص الميكانيكية تعدل بعض أنواع البرونز بالفناديوم ( $0.02-0.05\%$ ) والبروم ( $0.03-0.05\%$ ) أو التيتانيوم والبرون. وتستخدم خلائط البرونز لصناعة الأجزاء المقاومة للاحتكاك.

#### 9-2-4 البرونز اللاقصديري:

##### البرونز الألمينيومي:

وهي خلائط النحاس والألمنيوم التي تحتوي على  $9\%$  ألمنيوم، ويكون هذا البرونز عبارة عن محلول صلب أحادي الطور  $\alpha$  وهو ذو قابلية جيدة للتشكيل كما إن زيادة محتوى الألمنيوم فيها حتى  $10\%$  تزيد مقاومة الشد للنحاس أما الاستطالة النسبية فتزداد عند زيادة الألمنيوم عن هذا الحد. ولزيادة تحسين الخواص الميكانيكية تضاف لهذه الخلائط نسبة قليلة من النيكل والحديد. تستعمل هذه الخلائط في صنع بعض القطع التبديلية المعرضة للضغط والاحتكاك.

### البرونز السليكوني:

يتفوق البرونز السليكوني على البرونز القصديري من حيث خواصه الميكانيكية كما أنه أرخص ثمناً. ويتمتع البرونز السليكوني بصمود مرتفع ضد الصدأ وخاصة في القلويات.

### البرونز الرصاصي:

يحتوي البرونز الرصاصي على 30% رصاص. والرصاص والنحاس لا يذوب أحدهما في الآخر تقريباً في الحالة الصلبة، ولهذا في بنية البرونز الرصاصي تتكون بلورات النحاس الأكثر قساوة والرصاص الأكثر ليونة، وهذه البنية تفسر المقاومة الجيدة للاحتكاك في البرونز الرصاصي. ويتميز كذلك بموصلية حرارية مرتفعة ولهذا فنتيجة قدرته على صرف الحرارة سريعاً عن الطبقة السطحية فإنه يحتفظ بخواصه عند التسخين حتى  $350-300^{\circ}\text{C}$ . وتتميز خواص البرونز الرصاصي الميكانيكية بارتفاع قيم حد التعب والمتانة الصدمية بالمقارنة بالمواد الأخرى المقاومة للاحتكاك. ويستخدم البرونز الرصاصي لصناعة لقم محامل الآلات التي تقل بسرعة مرتفعة وتحت تأثير ضغوط عالية.

### 9-2-5 خلط النحاس مع النيكل:

تؤدي إضافة النيكل إلى النحاس إلى زيادة شديدة في خواصه الميكانيكية ومقاومة للصدأ وكذلك في المقاومة الكهربائية. وتعرف سبيكة النحاس المحتوية على 19-20% نيكل بخليطة الكوبرو-نيكل (الفضة الألمانية) وهي عبارة عن محلول صلب من النيكل والنحاس. والفضة الألمانية أكثر مقاومة للصدأ في العديد من الأحماض والقلويات بالمقارنة بالفولاذ غير القابل للصدأ. وتصلح هذه السبائك للعمل في درجات حرارة مرتفعة. تستخدم



الفضة الألمانية لصناعة الأدوات الطبية والنقود ولتحسين خواص الفضة الألمانية يضاف إليها أحياناً الزنك أو الرصاص.  
9-2-6 المعالجات الحرارية للنحاس وسبائكها:

النحاس:

إن المعالجة الوحيدة التي تجرى على النحاس النقي هي عملية التطرية لإزالة القساوة الناتجة عن التشكيل اللدن للنحاس والسماح للبنية بالتبلور من جديد. ويتم إزالة القساوة بالتسخين إلى درجة حرارة تتراوح بين  $500-650^{\circ}\text{C}$ ، وزمن الإبقاء في هذه الدرجة يتراوح بين ساعة وعدة ساعات (حسب سماكة القطعة). أما سرعة التبريد فلا تأثير لها على خواص النحاس إلا أنه يفضل التبريد السريع.

خلائط النحاس الأصفر:

تجرى أيضاً لهذه الخلائط عملية التطرية ويتم بنفس الشكل السابق ولكن في درجات حرارة أخفض حيث تتراوح درجة حرارة التسخين بين  $200-320^{\circ}\text{C}$  حسب نوع الخليطة وتركيبها الكيميائي. وفترة الإبقاء في هذه الدرجة تتعلق من جهة بدرجة الحرارة ومن جهة أخرى بسماكة القطعة المعالجة.

خلائط البرونز:

بالإضافة إلى عملية التطرية يمكن أن تجرى على خلائط البرونز معالجة تكريمية لإعاققة بعض الانفصالات الصلبة. تجرى أحياناً لبعض خلائط البرونز المسكوبة عملية التسخين وذلك لجعل البنية الناتجة عن السكب بنية متجانسة أو لزيادة قابلية القطعة للتشكيل. ويتم التنسيق بتسخين القطعة إلى درجة حرارة  $650-600^{\circ}\text{C}$  لفترة من الزمن تتعلق بسماكة القطعة وتركيبها الكيميائي ثم تبرد إما ببطء للحصول على بنية متجانسة أو بسرعة للحصول على بنية متجانسة قابلة للتشكيل.

### 9-3 النيكل وسبائكه:

#### 9-3-1 النيكل:

النيكل معدن فضي اللون ذو نسق بلوري متركز الوجه ينصهر النيكل عند  $1400^{\circ}\text{C}$ ، وكثافته تساوي  $8.907 \text{ g/cm}^3$ ، والنيكل معدن ذو انفاذية مغناطيسية عالية (فرومغناطيس) حتى  $360^{\circ}\text{C}$  (نقطة كيوري)، والمقاومة الكهربائية النوعية للنيكل تساوي  $0.0684 \Omega \cdot \text{mm/m}^2$ ، ومعامله الحراري للتمدد الطولي يساوي  $13.3 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  عند  $20^{\circ}\text{C}$ .

ويقسم النيكل إلى خمسة أنواع درجة نقاوته (99.99% نيكل + كوبالت)، (99.93%)، (99.8%)، (98.6%)، (97.6%)، والشوائب الأساسية التي توجد في النيكل هي الكوبالت، بكميات تتراوح بين 0.005% وحتى 0.7%، كذلك الكربون والمغنسيوم والألمنيوم والسليكون والفوسفور والكبريت والحديد وغيرها. والشوائب الضارة هي الكبريت والرصاص والبرصموت والانتيمون. فهذه الشوائب تقلل مقاومة النيكل وسبائكه للحرارة (أي تقلل المتانة عند درجات الحرارة العالية) كما تجعل تشكيله بالضغط على الساخن أكثر صعوبة، وذلك لأنها تكون أطوار سهلة الانصهار على الحدود بين الحبيبات. ويتميز النيكل بارتفاع مقاومته للحرارة وبمقاومة الصدأ (التحات الكيميائي) في بعض الأوساط مثل الوسط الجوي والماء العذب وماء البحر والقلويات والأحماض العضوية المخففة وغير ذلك من الأوساط. والخواص الميكانيكية للنيكل النقي كالآتي: معامل المرونة  $E=22000 \text{ kg/mm}^2$ ، مقاومة الشد القصوى  $= 28-30 \text{ kg/mm}^2$  الاستطالة 35-40%، القساوة = 65-70HB، والنيكل سهل الطرق والدرفلة واللحام بالمونه (بمعادن أخرى غير النيكل).



ويورد النيكل على هيئة شرائح وشرائط وقضبان وأسلاك ومواسير. ويستخدم النيكل لصناعة الأجهزة الكيميائية وغرف احتراق التربينات الغازية وفي صناعة حفظ الأغذية والمعدات الطبية وكذلك في الصمامات الكهربائية المفرغة من الهواء، وذلك لأن ضغط بخاره قليل وبالتالي لا يتبخر عند درجات التفريغ العالية.

### 9-3-2 سبائك النيكل:

تتميز سبائك النيكل بارتفاع مقاومتها وصمودها ضد الحرارة العالية، (ضد تكون القشور الأكسيدية) كما تتميز أيضاً بمقاومتها للصدأ (التحات الكيميائي). وتستخدم هذه السبائك في مجالات مختلفة بالصناعة. سبائك النيكل المقاومة لتكوين القشور الأكسيدية:

تضاف إلى النيكل كمية من الكروم تتراوح بين 15% و 30% للحصول على صمود مرتفع ضد تكون القشور الأكسيدية. ويمكن تفسير ارتفاع مقاومة سبائك النيكل والكروم ضد التأكسد بتكوين قشرة متينة ومصمتة من أكسيد الكروم أو أكسيد النيكل والكروم ( $\text{NiO.Cr}_2\text{O}_3$ ) على سطحها. وتؤدي إضافة الألومنيوم، والتيتانيوم إلى سبائك النيكل إلى زيادة إضافية في مقاومتها ضد تكوين القشور الأكسيدية. وهذه السبائك تلحم بشكل مقبول وتصلح لصناعة إجراء مختلفة بواسطة السحب العميق لشرائحها أو بالثني أو بطرق أخرى.

ويتسع استخدام سبيكتي النيكل التاليتين (المقاومتين) لتكوين القشور الأكسيدية: الأولى تحتوي على 23.5-26.5% كروم، 0.3-0.7% تيتانيوم و 13-14% تنجستن) والثانية تحتوي على 26-29% كروم، 2.6-3.5% ألومنيوم، أقل من 0.03% سريوم وأقل من 1% باريوم. وتؤدي إضافة السريوم والباريوم في سبائك النيكل إلى زيادة مقاومتها لتكوين القشور الأكسيدية عند

تكرار التسخين والتبريد. وتستخدم السبيكة الأولى لصناعة أنابيب الاشتعال بغرف الاحتراق بالتربينات وغرفة الحارق اللاحق (after burner) ولصناعة الأجزاء الأخرى التي تعمل عند  $850-1000^{\circ}\text{C}$ . أما الأجزاء التي تعمل عند درجات حرارة تصل إلى  $1100^{\circ}\text{C}$  فتصنع من السبيكة الثانية.

السبائك المقاومة لتكوين القشور الأكسيدية ذات المقاومة الكهربائية المرتفعة: تتميز المحاليل الصلبة التي يشكل النيكل — أساسها بارتفاع مقاومتها الكهربائية. وأكثر سبائك المقاومات الكهربائية شهرة هي سبائك النيكل مع الكروم وتعرف بسبائك النيكروم. وتزيد المقاومة الكهربائية لسبائك النيكروم عن مقاومة الحديد التجاري بمقدار عشر مرات.. وتستخدم سبيكة النيكروم على نطاق واسع. ويستبدل جزء من النيكل بالحديد في سبائك النيكروم لتقليل ثمنها ولتحسين خواصها التكنولوجية وتسمى سبائك النيكروم المحتوية على الحديد بسبائك الفرونيكروم. وتصل المقاومة الكهربائية للفرونيكروم إلى 1.2-1  $\Omega\cdot\text{mm}/\text{m}^2$ ، ومقاومته لتكوين القشور إلى  $1000-1100^{\circ}\text{C}$ . وتستخدم سبائك النيكروم لصناعة عناصر التسخين الخاصة بالأفران الكهربائية ولصناعة الجزاء ذات المقاومة الكهربائية العالية.

#### سبائك النيكل المقاومة للحرارة:

تعرف سبائك النيكل المقاومة للحرارة (المتينة عند درجات الحرارة العالية) بسبائك النيمونيوم. وتستخدم هذه السبائك لصناعة الأرياش العاملة وأقراص التربينات والحلقات والمثبتات التي تعمل لفترات زمنية طويلة وأرياش المنافث وغير ذلك من أجزاء التربينات الغازية، التي تعمل عند  $650^{\circ}\text{C}$  - 850. ويضاف الكروم (حوالي 20%) إلى النيكل للحصول على مقاومة مرتفعة تكوين القشور الأكسيدية، أما التيتانيوم (1-2.8%) والالومنيوم (0.55-5.5%) فيضافان إلى النيكل لتحسين مقاومته للحرارة (أي للحفاظ على المتانة عند

درجات الحرارة المرتفعة) وفي هذه الحالة يتكون في المحلول الصلب الأساسي  $\gamma$  الطور المعدني  $\gamma'$  [طراز  $(\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al}))$ ]، وكذلك كبريد التيتانيوم ونتريد التيتانيوم وذلك أثناء تعتيق السبيكة المسقاة، ويؤدي تكوين هذه الأطوار إلى زيادة المتانة عند درجات الحرارة المرتفعة. وتتحقق مقاومة إضافية للحرارة بإضافة 2-11% موليبدنم، 2-11% تنجستن إلى السبيكة، لأن الموليبدنم والتنجستن يزيدان من درجة حرارة إعادة التبلور ويعوقان عملية الانتشار في المحلول الصلب، التي تعتمد عليها عمليتا تضخم الأطوار غير الذائبة إعادة التبلور. وتؤدي إضافة كمية من الكوبالت تتراوح نسبتها بين 4% و 16% إلى زيادة إضافية في مقاومة الحرارة وفي لدونة السبائك عند تشكيلها. ويضاف البورون والزركونيوم إلى السبيكة لتمتين حدود حبيبات المحلول الصلب جاما ( $\gamma$ ). فهذان العنصران يزيلان الأثر الضار للشوائب، لأنهما يرتبطان مع الشوائب على هيئة مركبات صعبة الانصهار. وتؤدي شوائب الكبريت والانتيمون والرصاص والقصدير إلى انخفاض مقاومة السبائك للحرارة وإلى جعل تشكيل هذه السبائك بالضغط أمراً عسيراً. ولهذا فلزيادة مقاومة هذه السبائك للحرارة يجب عند إعدادها (صهرها) استخدام خامات نقية وخالية من الشوائب الضارة السهلة الانصهار (مثل الكبريت والرصاص والبزموت والانتيمون والقصدير). سبائك النيكل المقاومة للأحماض:

تتمتع سبائك النيكل مع النحاس، مثل السبيكة في بناء السفن وفي صناعة تكرير النفط وصناعة الدواء، وتتراوح مقاومة الشد القصوى لهذه السبيكة بين  $45-65 \text{ kg/cm}^2$ ، أما الاستطالة فتساوي 25-30%. وتعرف سبائك النيكل المحتوية على 14-17% كروم و 6-10% حديد باسم سبائك الاينكونل (Inconel). وتستخدم هذه السبائك لصناعة الأجزاء التي

يجب أن تتمتع بمتانة مرتفعة ومقاومة جيدة للصدأ وبالقدرة على العمل في  
أوساط مؤكسدة عند درجات حرارة تصل إلى  $800^{\circ}\text{C}$ .

وتسمى سبائك النيكل المحتوية على 20-30% موليبدنيوم باسم  
الهاسستيلوي (Hastelloys). وهذه السبائك تقاوم فعل الحامض الكبريتيك  
والايدروكلوريك إلا أنها عرضة لحدوث صدأ بين حبيباتها بعد التسخين حتى  
 $600-850^{\circ}\text{C}$ . ويقل ميل هذه السبائك لحدوث صدأ بين حبيباتها إذا أضيف  
إليها الموليبدنم والفناديوم.

وكثيراً ما تحتوي سبائك الهاسستيلوي على الحديد (7-20%) الذي  
يحسن قابليتها للتشكيل بالضغط. ويؤدي الكروم والتجستن إلى تحسين صمود  
سبائك الهاسستيلوي ضد تكون القشور الاكسيدية. ويمكن تحقيق مزيج مثالي من  
مقاومة الصدأ والمتانة الصدمية بعد تسقية هذه السبائك من  $1150^{\circ}\text{C}$ -  
1175 بالماء أو الهواء وسبائك الهاسستيلوي سهلة التشكيل بالضغط والقطع  
وسهلة اللحام إلى حد مقبول.

#### سبائك النيكل الأخرى:

تستخدم سبائك النيكل والمنجنيز على نطاق واسع لصناعة الكترودات  
شموع الاحتراق الخاصة بمحركات الاحتراق الداخلي، وفتائل المصابيح  
الكهربائية والمقاومات الكهربائية وشبكات صمامات الراديو. والمنجنيز الموجود  
في هذه السبائك يزيد من مقاومتها ضد التحات كما ينزع الأكسجين والغازات  
منها، الأمر الذي يسهل الحصول على اغفال جيدة (شرائط وأسلاك). وتستخدم  
السيبكة المصنوعة من النيكل مع السيلكون لصناعة أجزاء الصمامات الكهربائية  
المفرغة والأجهزة الهندسية الكهربائية. وفي حالة صناعة كاثودات (مهبط)  
صمامات الراديو يزداد يحتوى السيلكون حتى 3.0%.

#### 9-4 التيتانيوم وسبائكه:

##### 9-4-1 التيتانيوم:

التيتانيوم معدن أبيض اللون، ينصهر عند  $1665 \pm 5^\circ\text{C}$ . ويتواجد التيتانيوم في طورين مختلفين (تأصلين): فحتى  $882^\circ\text{C}$  يوجد التيتانيوم ألفا ( $\alpha$ ) (وكثافة  $4.505 \text{ g/cm}^3$ ) وهو عبارة عن بلورات ذات نسق سداسي. أما عند درجات الحرارة الأعلى فيوجد التيتانيوم على هيئة تيتانيوم بيتا ( $\beta$ ) (وكثافة  $4.32 \text{ g/cm}^3$  عند  $900^\circ\text{C}$ )، ونسقه البلوري عبارة عن المكعب المتمركز الوسط. والشوائب الضارة للتيتانيوم هي النيتروجين والأكسجين والهيدروجين، التي تعطي معه محاليل انغراسية جامدة وأكسيد وكربيدات ونتريدات وإيدريدات قصيفة، وهذه الشوائب تقلل اللدونة وتدهور قابلية التيتانيوم للحام، وتزيد متانته وصلادته وتقلل مقاومته للصدأ.

ويتميز التيتانيوم النقي بالخواص الميكانيكية التالية: مقاومة الشد القصوى  $= 25 \text{ kg/mm}^2$ ، والاستطالة  $= 70\%$ . أما التيتانيوم التجاري المحتوي على كمية أكبر من الشوائب، فتصل مقاومة الشد القصوى له إلى 30-55  $\text{kg/mm}^2$ ، واستطالته إلى 20-30%. وكلما زادت كمية الشوائب تزيد المتانة وتقل اللدونة.

وتتكون على سطح التيتانيوم بسهولة قشرة أكسيدية متينة وثابتة، ولهذا يتميز التيتانيوم بارتفاع مقاومته ضد الصدأ في الماء العذب وماء البحر وكذلك في بعض الأحماض، وبصموده ضد الصدأ النخري والصدأ الاجهادي. وعندما تزيد درجة الحرارة عن  $500^\circ\text{C}$  يتأكسد التيتانيوم وسبائكه بسهولة ويمتص الهيدروجين الذي يؤدي إلى التقصف.

#### 9-4-2 سبائك التيتانيوم:

للحصول على سبائك التيتانيوم يضاف إليه الألومنيوم والمولبدنم والفناديوم والمنغنيز والكروم والقصدير والحديد والزركونيوم والنيوبيوم وكذلك كميات قليلة من السليكون. وتضاف هذه العناصر إلى التيتانيوم لتحسين خواصه الميكانيكية ولتحسين مقاومته للصدأ. وعادة تحتوي جميع سبائك التيتانيوم الصناعية على الألومنيوم. لنظام سبائك التيتانيوم مع الألومنيوم أهمية كبرى بين سبائك التيتانيوم، وهذه الأهمية تعادل مكانة منظومة سبائك الحديد مع الكربون بين سبائك الحديد، ويؤدي الألومنيوم إلى زيادة مقاومة الشد القصوى، ولكنه يقلل لدونة سبائك التيتانيوم.

وتقسم سبائك التيتانيوم حسب بنيتها كالاتي: السبائك ألفا، وبنيتها عبارة عن محلول صلب لعناصر الخلط السبائكي الذائبة في التيتانيوم ألفا (أنظر الشكل 9-11-a). وعنصر الخلط السبائكي الأساسي في السبائك ألفا هو الألومنيوم. وبالإضافة إلى ذلك يمكن أن تحتوي هذه السبائك على بعض العناصر المحايدة (مثل القصدير والزركونيوم) وعلى كمية قليلة من العناصر المثبتة للطور بيتا ( $\beta$ ) (مثل المنجنيز، والحديد، والكروم، والمولبدنم).

السبائك ألفا + بيتا، وتتكون من الطورين الصلبين ألفا وبيتا (شكل 9-11-b). وبالإضافة إلى الألومنيوم تحتوي السبائك ألفا + بيتا ( $\beta + \alpha$ ) على 2-4 % من العناصر المثبتة للطور  $\beta$  مثل (الكروم والمولبدنم والحديد وغيرهم).

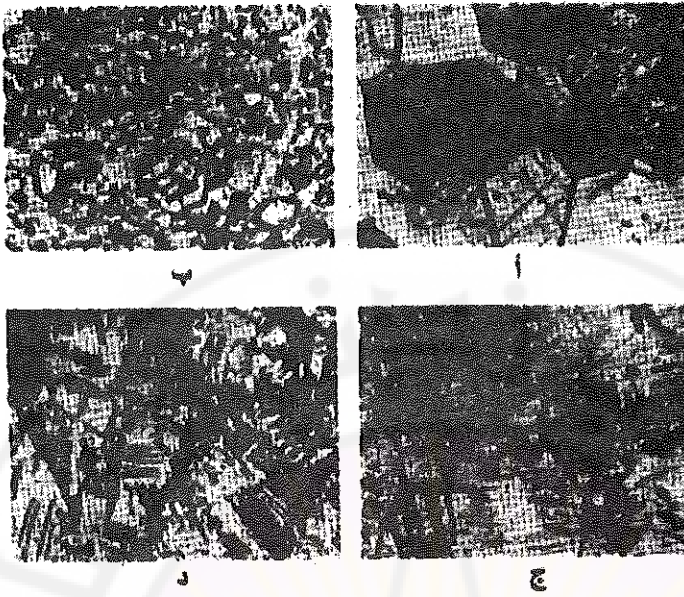
السبائك بيتا ( $\beta$ )، وبنيتها عبارة عن محلول صلب لعناصر الخلط السبائكي الذائبة في التيتانيوم بيتا، وتحتوي هذه السبائك على كمية كبيرة من العناصر المثبتة للطور بيتا.

ويمكن أن تعرض سبائك التيتانيوم، حسب تركيبها ومجال استخدامها، لعمليات التلدين والتسقية والتعتيق والمعالجة الكيميائية الحرارية (النتردة، الكربنة

....الخ). ولا يمكن تمثيل التيتانيوم وسبائكه ألفا بالمعالجة الحرارية، وتعرض هذه المواد للتلين المعيد للتبلور فقط عند  $750-850^{\circ}\text{C}$ . أما السبائك ألفا + بيتا فيطبق عليها التلين عند درجة حرارة ثابتة، ويتلخص هذا التلين في التسخين عند  $850-950^{\circ}\text{C}$  (تبعاً لتركيب السبيكة) مع التبريد التالي في الهواء حتى  $500-650^{\circ}\text{C}$  ثم الإبقاء عند هذه الدرجة والتبريد بعد ذلك في الهواء. وتكفل هذه المعالجة الحرارية أقصى قدر من الثبات الحراري للبنية. وعملياً، لا يستخدم التلين الذي يحدث أثناء تحول طوري كامل بغرض تصغير حجم حبيبات التيتانيوم وسبائكه.

ولإزالة الاجهادات الداخلية، الناتجة عن تشكيل السبائك ألفا وألفا + بيتا بالقطع يجرى تلين غير تام عند  $550-600^{\circ}\text{C}$ . وخلافاً للسبائك ألفا يمكن تمثيل السبائك ألفا + بيتا بالتقسية المتبوعة بالتعتيق. فعند تبريد السبائك المسخنة حتى المنطقة بيتا (أو بيتا + ألفا) تبريداً سريعاً (أي عند تسقيتها) يحدث تحول مارتنزيتي ويمكن تعريض سبائك التيتانيوم للمعالجة الكيميائية الحرارية. فمثلاً، يعرض التيتانيوم للتردد عند  $850-950^{\circ}\text{C}$  لمدة 30 ساعة في وسط من النتروجين لزيادة مقاومته للبلل. ويصل سمك الطبقة المنتrede في سبائك التيتانيوم بعد الفترة عند  $950^{\circ}\text{C}$  لمدة 30 ساعة إلى 0.05-0.15 ملم (قساوة الطبقة تساوي HV 750-900 حسب تركيب السبيكة). وتستخدم أنواع أخرى من المعالجة الحرارية الكيميائية على نطاق أضيق.





شكل 9-11

البنية الميكروسكوبية لسبائك التيتانيوم، التكبير 100  
 أ - الطور  $\alpha$ ، ب - الطور  $\beta + \alpha$ ، ج - الطور  $\alpha'$ ، د - الطور  $\alpha + \beta$   
 (المناطق الفاتمة).

#### 3-4-9 مجالات استخدام السبائك:

يستخدم التيتانيوم وسبائكه في تلك المجالات التي تلعب فيها المتانة النوعية والمقاومة الجيدة ضد الصدأ الدور الأساسي، فتستخدم سبائك التيتانيوم في صناعة الطائرات (تكسية الطائرات ، أقراص وأرياش الضاغط والجزاء المثبتة.... الخ). وصناعة الصواريخ (هياكل محركات المرحلة الثانية والثالثة



وأنايب الغازات المضغوطة والسائلة والمنافث...الخ). وصناعة المكثات المنتجة للكيمويات (معدات بعض الأوساط مثل الكلور الرطب والمحاليل المائية والحمضية للكلور والمبادلات الحرارية، التي تعمل في حامض النيتريك... الخ)، وفي بناء السفن (الرفاصات، وتكسية السفن البحرية، والغواصات والطوربيدات)، وفي العديد من المجالات الصناعية والإنتاجية. وتتميز سبائك التيتانيوم بارتفاع قساوتها عند درجات الحرارة المنخفضة مما يجعلها صالحة للاستخدام في هندسة التبريد.

5-9 المنقسيوم وسبائكته:

### 9-5-1 المغنسيوم:

المغنسيوم معدن ومادي فاتح اللون، والسمة المميزة للمغنسيوم كثافته المنخفضة ( $1.74 \text{ g/cm}^3$ ). وينصهر المغنسيوم عند  $650^\circ \text{C}$ . وللمغنسيوم نسق بلوري سداسي، ومعاملا التمدد الطولي للألومنيوم والمغنسيوم تقريبا. والشوائب التي توجد بالمغنسيوم هي الحديد والسليكون والنيكل والصدديوم والألومنيوم والمنجنيز. ويعد الحديد والنيكل والنحاس والسليكون من العناصر الضارة التي تقلل مقاومة المغنسيوم للصدأ. ويتميز المغنسيوم المسبوك بالخواص الميكانيكية التالية: مقاومة الشد القصوى  $= 11.5 \text{ kg/mm}^2$ ، إجهاد الخضوع  $= 2.5 \text{ kg/mm}^2$ ، الاستطالة  $= 8\%$  ومعامل المرونة  $= 4500 \text{ kg/mm}^2$ ، والقساوة 30HB، أما المغنسيوم المشكل (الأسياخ المضغوطة) فيمتاز بالخواص التالية: مقاومة الشد القصوى  $= 20 \text{ kg/mm}^2$ ، إجهاد الخضوع  $= 9 \text{ kg/mm}^2$ ، الاستطالة  $= 11.5\%$  ومعامل المرونة  $= 4500 \text{ kg/mm}^2$ ، والقساوة 40HB. ويشتعل المغنسيوم في الهواء بسهولة. ويستخدم المغنسيوم لصناعة الصواريخ النارية وفي الصناعة الكيميائية.

## 9-5-2 سبائك المغنسيوم:

من الممكن تحسين خواص المغنسيوم بشكل ملحوظ بإضافة عناصر خلط سبائكي إليه. وفي الغالب، تستخدم سبائك المغنسيوم مع الألومنيوم (حتى 10%) ومع الزنك (حتى 5-6%) والزركونيوم (حتى 1.5%) والمنغنيز (حتى 2.5%). إن الألومنيوم والزنك، يكونان مع المغنسيوم محاليل صلبة وأن المركبين  $MgZn_2$  و  $Mg_4Al_3$  بكمية تصل إلى 6-7%، تعمل على تحسين الخواص الميكانيكية للمغنسيوم.

ويعطي المنغنيز مع المغنسيوم محلولاً صلباً  $\alpha$ . ومع انخفاض درجة الحرارة تقل ذوبانية المنغنيز في المغنسيوم ويفصل الطور  $\beta$  من المحلول الصلب  $\alpha$ . والمنغنيز يزيد مقاومة سبائك المغنسيوم للصدأ ويحسن قابليتها للحام، ولكن بدون إحداث أي تحسين في الخواص الميكانيكية. وتعلل هذه الزيادة في مقاومة الصدأ بتكوين قشرة واقية من الأكسيد المائي للمغنسيوم والمنغنيز وبتنقية السبيكة من الحديد. وعند إضافة الزركونيوم إلى سبائك المغنسيوم مع الزنك يقل حجم الحبيبات وتحسن الخواص الميكانيكية وتزداد مقاومة الصدأ. وتؤدي العناصر الأرضية النادرة والتورיום إلى زيادة مقاومة سبائك المغنسيوم للحرارة. وتؤدي إضافة البيريليوم بكمية قدرها 0.005-0.012% إلى تقليل قابلية المغنسيوم للتأكسد أثناء الصهر والسباكة والمعالجة الحرارية.

وتقسم سبائك المغنسيوم، شأنها في ذلك شأن الألمنيوم إلى مجموعتين:

أ - سبائك السباكة، وتستخدم للحصول على الأجزاء بطريقة سباكة الأشكال المعقدة.

ب - سبائك التشكيل، وتعرض للتشكيل بالبنق والدرفلة والطرق في قوالب التشكيل، ولأنواع التشكيل الأخرى بالضغط.

وبعض سبائك السباكة والتشكيل يمكن أن تمتن بالمعالجة الحرارية في حين لا يمكن تمتين بعضها الآخر. وثمة تشابه كبير بين المعالجة الحرارية لسبائك المغنسيوم والمعالجة الحرارية لسبائك الألمنيوم. ومن أجل إزالة التقسية الانفعالية تعرض سبائك المغنسيوم للتلدين المعيد للتبلور عند حوالي  $350^{\circ}\text{C}$ . ويمكن تمتين بعض سبائك المغنسيوم بالتسقية والتعتيق. ويؤدي التسخين إلى إذابة الأطوار الفائضة مع الحصول بعد التسقية على محلول صلب مفرط التشبع. وفي أثناء عملية التعتيق تنفصل الأطوار الممتنة (المؤدية إلى زيادة المتانة). ومن السمات المميزة لسبائك المغنسيوم قلة سرعة العمليات الانتشارية، لهذا تحدث التحولات الطورية ببطء، وهذا الأمر يتطلب الإبقاء لفترات طويلة أثناء التسخين قبل التقسية (من 4 إلى 24 ساعة) وأثناء عملية التعتيق الاصطناعي (من 16 إلى 24 ساعة). ولنفس هذا السبب يمكن إجراء التقسية في الهواء. فمن الممكن أن تحدث عملية التقسية (تثبيت البنية بالتبريد السريع) أثناء التبريد في الهواء بعد التشكيل اللدن (بالضغط) على الساخن، وبالتالي يمكن تمتين هذه السبائك بإجراء التعتيق الاصطناعي بدون تقسية سابقة. ويجري تعتيق سبائك المغنسيوم المشكلة بالسباكة عند  $200-300^{\circ}\text{C}$ . وتسقي سبائك المغنسيوم من  $380-420^{\circ}\text{C}$ . وبعد التقسية يجري تعتيق اصطناعي عند  $175-200^{\circ}\text{C}$ . وتزداد متانة سبائك المغنسيوم أثناء التعتيق بنسبة 20-35% فقط وعند ذلك تقل لدونة السبائك.

### 9-5-3 مجالات الاستخدام:

نظرا لارتفاع المتانة النوعية تستخدم سبائك المغنسيوم في بناء الطائرات (العجلات وشعب قاعدة الهيكل والحواف الأمامية للأجنحة والأذرع المختلفة)

وهياكل الأجهزة ومصابيح وأبواب المقصورات... الخ) وفي بناء الصواريخ (هياكل الصواريخ، والأغطية الانسيابية وخزانات الوقود والأكسجين والأسطح الموازية — Stabitzers — وغيرها) وفي صناعة السيارات (علب المرافق وصناديق السرعات وغيرها) وفي الصناعات الكهربائية والراديو (هياكل الأجهزة والتليفزيونات... الخ). وبسبب قلة الصمود ضد الصدأ تعرض المنتجات المصنوعة من سبائك المغنسيوم لعملية أكسدة يغطي السطح المؤكسد بطلاء ورنيش واق.

#### 6-9 المعادن الصعبة الانصهار وسبائكها:

تسمى المعادن التي تزيد درجة حرارة انصهارها عن الحديد بالمعادن الصعبة الانصهار. وتحظى المعادن الصعبة الانصهار التالية بالأهمية القصوى في الصناعة: النيوبيوم، المولبدنم، الكروم، التنتالم والتنجستن التي تنصهر على التوالي عند  $2415^{\circ}\text{C}$ ،  $2625^{\circ}\text{C}$ ،  $1900^{\circ}\text{C}$ ،  $2996^{\circ}\text{C}$ ،  $3410^{\circ}\text{C}$ . وقد زاد الاهتمام بشكل واضح بالمعادن الصعبة الانصهار وسبائكها في مجالات صناعة الصواريخ والسفن الفضائية والمفاعلات الذرية وتطوير معدات الطاقة وفي صناعة الأجزاء والوحدات التي تعمل عند درجات حرارة تصل إلى  $1500^{\circ}\text{C}$  -2000. وتستخدم المعادن الصعبة الانصهار وسبائكها كمعادن مقاومة للحرارة أساساً.

ويتميز المولبدنم والتنجستن والكروم بمقاومة ضد الحرارة، إلا أن هذه المعادن عرضة للكسر القصيف بسبب ارتفاع درجة حرارة التحول من اللدونة إلى القصف، وتؤدي شوائب الذرات المنغرس في النسق البلوري (Interstitial) مثل الكربون والنيتروجين والهيدروجين والأكسجين إلى زيادة درجة التحول من اللدونة إلى القصف بشكل شديد. وتقل درجة الحرارة الانتقالية من اللدونة

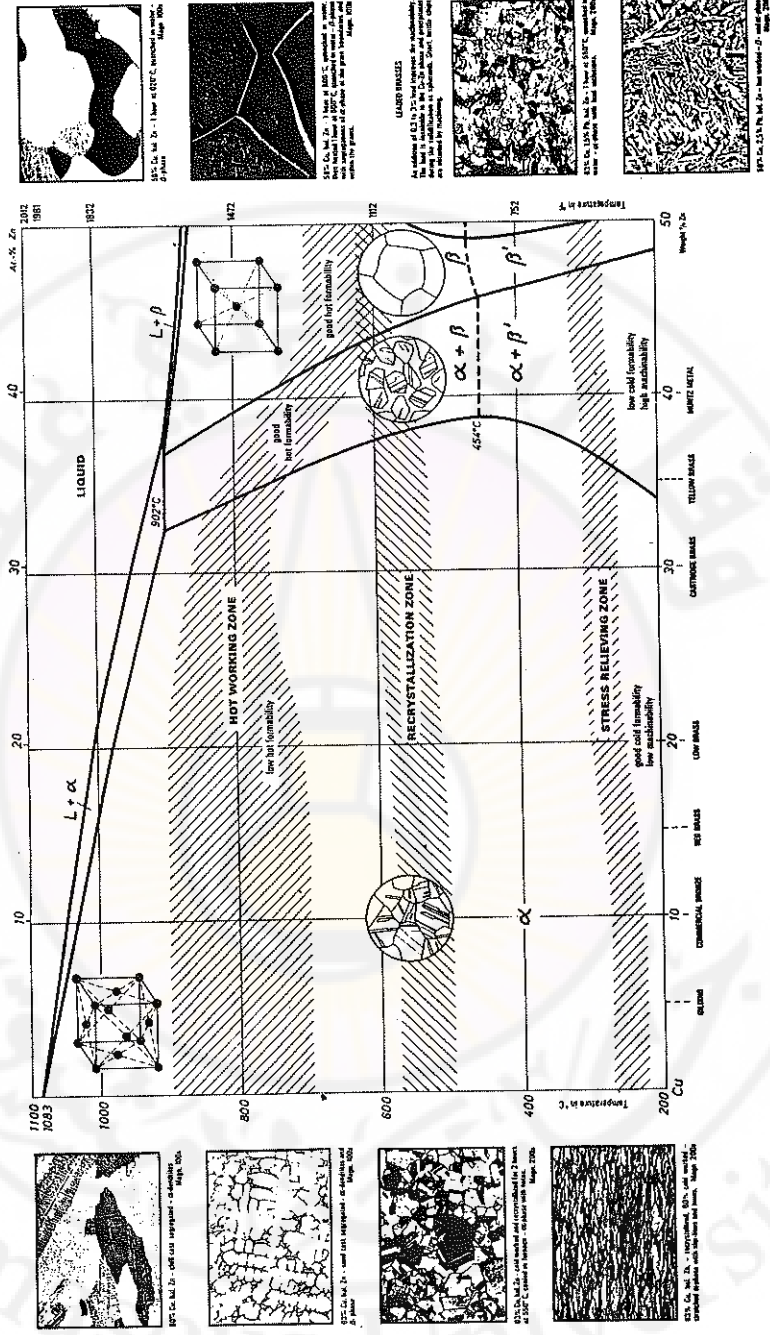
إلى القصف في كل من المولبدنم والتنجستن بعد تشكيلها على البارد عند درجة حرارة تقل عن درجة حرارة إعادة التبلور (  $1100-1300^{\circ}\text{C}$  ). ويختلف النيوبيوم والتنتالم عن التنجستن والمولبدنم بتمتعها بلدونة مرتفعة وقابلية جيدة للحام. ويجدر التنويه بأن درجة حرارة انتقال النيوبيوم من اللدونة إلى القصف أقل وبأن تأثير الشوائب الانغراسية عليه أقل، وتتميز المعادن المذكورة بارتفاع صمودها ضد التآكل الكيميائي (الصدأ) بما في ذلك في الأوساط الحامضية والقلوية. ويستخدم المولبدنم والتنجستن النقيان في الصناعات الإلكترونية والراديو (فتائل التوهج، والانودات الشرائحية، والشبكات ونوابض الكاثودات والمسخنات والملامسات...الخ. ونتيجة للمقطع العرضي الصغير لمصيدة النيوترونات ولعدم التفاعل مع المعادن القلوية المنصهرة يستخدم النيوبيوم لصناعة مبادلات (ناقلات) الحرارة بالمفاعلات الذرية.

ولا تتميز المعادن النقية بمقاومة مرتفعة للحرارة (أي بمتانة عالية عند درجات الحرارة المرتفعة). أما سبائك المعادن الصعبة الانصهار فتتمتع بمقاومة أعلى ضد الحرارة ولكن يجب أن تأخذ في الاعتبار أن إضافة عناصر الخلط السبائكي، بغية زيادة مقاومة الحرارة، تؤدي إلى تقليل اللدونة، وتتحقق الزيادة في مقاومة الحرارة نتيجة لتكوين محلول صلب سبائكي أو لتكوين محلول صلب يتمتن متانة إضافية بواسطة رواسب دقيقة ومشتتة مثل الكربيدات والأكاسيد.

تتميز جميع المعادن المقاومة للحرارة (المتينة عند درجات الحرارة العالية) بانخفاض صمودها ضد تكوين القشور الأكسيدية. ولهذا فعندنا تزداد درجة الحرارة عن  $600-800^{\circ}\text{C}$  يجب حمايتها من الأكسدة. وقد ابتكرت أنواع معدنية ومعدنية بينية وخزفية من التغليف (التغطية) الواقي من التأكسد. وفي الغالب يستخدم التغليف السطحي للأجزاء التي تعمل لفترة زمنية وجيزة أو لمرة واحدة فقط. وتستخدم المعادن الصعبة الانصهار على نطاق واسع كمواد

مقاومة للحرارة وذلك للتشغيل في أوساط غير مؤكسدة مثل الفراغ والأيدروجين والغازات الخاملة وكذلك في وسط الغازات البارودية المنبعثة. وينتظر أن ينتشر استخدام سبائك النيوبيوم على نطاق واسع في العديد من المجالات التقنية (الهندسية). فهذه السبائك تتميز بخواص تكنولوجية جيدة وبارتفاع مقاومتها للحرارة حتى درجات حرارة تصل إلى  $1300^{\circ}\text{C}$ . وتؤدي إضافة التتجستن والمولبدنم أو كميات أقل من الزركونيوم أو الفناديوم إلى زيادة ملحوظة في مقاومة النيوبيوم للحرارة مع احتفاظه بلدونة مرتفعة، وتقل درجة حرارة الانتقال من اللدونة إلى القصف بالنيوبيوم عن  $196^{\circ}\text{C}$  تحت الصفر.

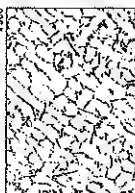
# CAST AND WROUGHT BRASSES - PARTIAL Cu-Zn-PHASE-DIAGRAM





# Aluminium-Silicon Casting Alloys

**Properties**  
Low density (2.52-2.80 g/cm<sup>3</sup>), good casting characteristics. May be cast in conventional, high pressure, or centrifugal casting. Excellent strength to weight ratio. Good machinability, weldable. By adding Cu or Mg as alloying elements, tensile strength and hardness may be increased by age hardening.

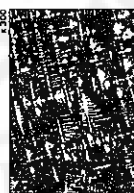


Aluminium-silicon casting alloy (12.0 wt.% Si) showing fine, uniform distribution of silicon particles.

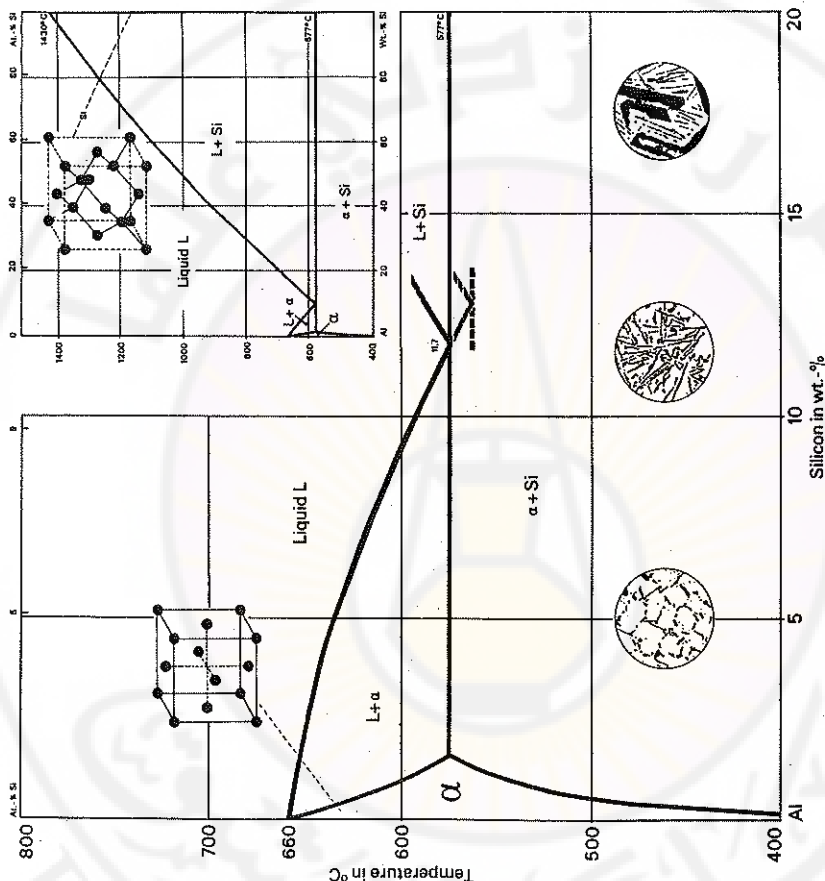


Aluminium-silicon casting alloy (12.7 wt.% Si) showing slightly coarser distribution of silicon particles.

**Refining Methods**  
By adding 0.05-0.1% Na or Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> 5-10 minutes before the casting at 750-780°C the chemical properties improve considerably. The maximum refining point is obtained at 0.1% Na, 0.1% Si and 0.1% Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>.

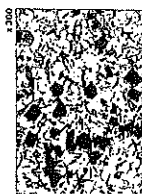


Aluminium-silicon casting alloy (12.7 wt.% Si) showing very fine, uniform distribution of silicon particles after refining.



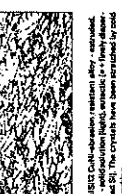
Aluminium-silicon casting alloy (12.0 wt.% Si) showing fine, uniform distribution of silicon particles.

**Abrasion resistant Aluminium Alloys**  
Extrinsic and hypereutectic aluminium-silicon alloys (12-25% Si) with additions of Ni, Cu, Mg, and Ti have high wear resistance and good strength and good heat resistance.



Aluminium-silicon casting alloy (12.7 wt.% Si) showing slightly coarser distribution of silicon particles.

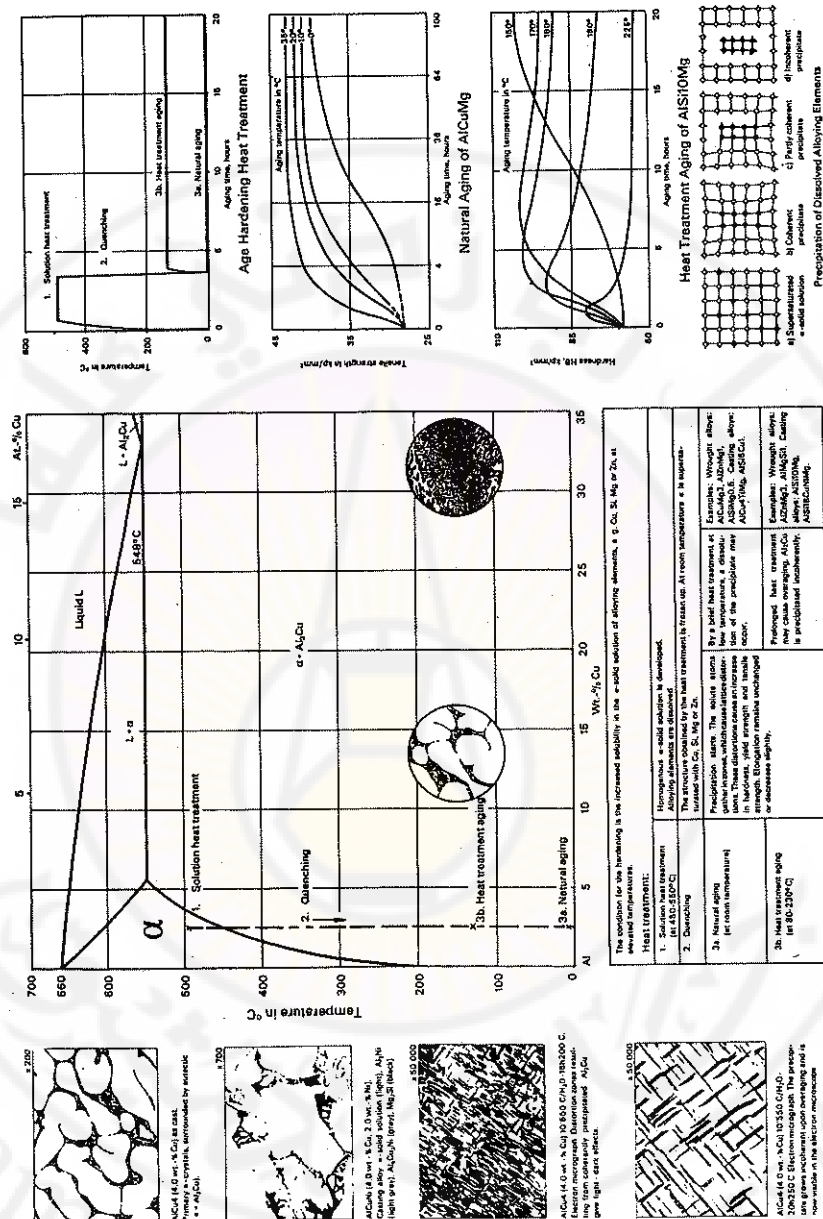
**Al-Si-Cu-Ni casting alloy - 12.7 wt.% Si**  
Primary Si crystals (dark, rounded) in Al matrix. Backscattered electron micrograph (BSE-SEM).



Aluminium-silicon casting alloy (12.7 wt.% Si) showing fine, uniform distribution of silicon particles.



# Age-Hardening of Aluminium Alloys





## **الفصل العاشر**

### **المواد المركبة**

**1.10 تصنيف المواد المركبة**

**2.10 سمات مواد التسليح والتعبئة في المواد المركبة**

**3.10 المواد المركبة المعدنية**

**4.10 المواد المركبة البوليميرية**

**5.10 المواد المركبة الكربونية**

**6.10 المواد المركبة التريبولوجية**



# المواد المركبة

## Composite materials

### 1-10 المقدمة:

يرتبط التقدم في مجال بناء الطائرات والفضائيات بالتصميم والاستعمال الواسع للمواد المركبة ( التركيبات ). تتمتع المواد المركبة بمجموعة من الخواص والصفات التي تتميز بها عن المواد الإنشائية الكلاسيكية وتعطي بالإجمال الإمكانية الواسعة لإنهاء التصميمات الموجودة وكذلك لتنفيذ تصميمات وعمليات تكنولوجية جديدة.

تكون المواد المركبة في جميع الحالات عبارة عن نظام مواد مختلفة تملك كل مادة من التركيبة هدف محدد للاستخدام في العنصر المحضر منها. وعلى سبيل المثال لا يستطيع المطاط ولا أسلاك عجلات الطائرات من تنفيذ وظيفته كل لوحده، فهم يستخدمون معاً ويجب دراستهم كنظام واحد. وتختلف خواص التركيبات من مواد جديدة كماً ونوعاً عن خواص المواد التي تدخل في هذه التركيبة.

نحصل على المواد المركبة ذات أنظمة متغايرة الأطوار من عنصرين أو أكثر مع الحفاظ على خاصية كل عنصر لوحده. وتتصف المواد المركبة الإنشائية بالصفات التالية:

1. يحدد تركيب وشكل المواد مسبقاً؛
2. تتواجد العناصر في كميات تؤمن خواص المادة المحددة؛

3. تعتبر المادة من الناحية الماكروية متجانسة وغير متجانسة من الناحية الميكروية ( تختلف العناصر بالخواص وتوجد بينهم حدود تقسيم واضحة ).

وتعتمد خواص المواد المركبة على تركيب العناصر الداخلة ومقاطعها ونسبها الكمية ومثانة الاتصال بين هذه العناصر.

## 10-2 تصنيف المواد المركبة:

تنقسم المواد المركبة من حيث شكل العناصر إلى:

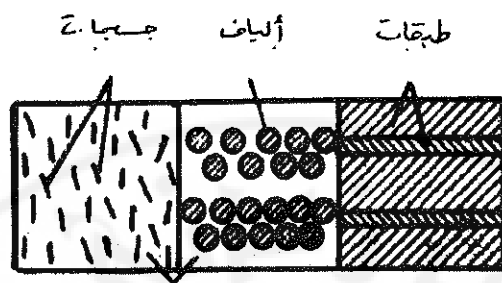
- ليفي: تتألف المادة من ألياف في قالب أو حاضن،
- طبقي: تتألف المادة من طبقات من مواد مختلفة،
- مقوى تشبتي: تتألف من حاضن معبأ بجزيئات،
- خلأط كاذبة: تتألف من مساحيق عبارة عن حاضن أو هيكل معبأ بمواد سهلة الانصهار،

○ يونكتيكية: نحصل عليها بعمليات التبلور الموجه للخلأط اليونكتيكية.

وهناك ثلاث أنواع من المواد المركبة التي استخدمت بشكل واسع وهي المواد المركبة ذات الجسيمات المسلحة والمواد المركبة ذات الألياف المسلحة والمواد المركبة الطبقية. ويبين الشكل 10-1 مخطط تكوين بنية هذه المواد.

يمكن تقسيم المواد المركبة من حيث شكل الحاضن إلى ثلاث مجموعات: معدنية وبوليميرية وسيراميكية. من هذه الأشكال تملك المواد المركبة ذات الحاضن البوليميري تسمية عمومية تضم شكل ألياف التسليح والحاضن: بلاستيك كربوني، بلاستيك زجاجي، بلاستيك بوروني، بلاستيك معدني. أما المواد المركبة ذات الحاضن المعدني أو السيراميكي فتتمثل بأسماء

مضاعفة تضم تسمية الألياف وتسمية الحاضن: Cu-W, WC-Co, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Al .



الحاضن

الشكل 10-1

مخطط بنية المواد المركبة

### 10-3 سمات مواد التسليح والتعبئة في المواد المركبة:

تستخدم بشكل واسع مواد التعبئة مثل جسيمات دقيقة التشتت من مختلف المساحيق أو مواد ليفية مختلفة كعناصر تسليح، وبذلك تقسم المواد المركبة إلى مجموعتين التقوية التشتتية والليفية.

التركيبات ذات التقوية التشتتية هي عبارة عن مادة موضوعة في الحاضن الذي يمتلئ بشكل منتظم بجسيمات دقيقة التشتت وهذه الجسيمات هي المادة الثانية. وفي مثل هذه المواد وعند التحميل يقوم الحاضن (الذي عملياً لا تنوب الجسيمات فيه بشكل كامل وتشكل طور ثاني في البنية) بأخذ كل الحمولة ويقاوم بشكل فعال التشوهات اللدنة وسرعة حدوثها التي تحدد بحركة الانزلاقات. تعطي جسيمات الطور الثاني المتشتتة (على سبيل المثال المواد المتحدة كيميائياً على شكل كربيدات ونتريدات وبوريدات والأكاسيد) متانة عالية

ودرجة انصهار عالية وتنشأ في المادة المركبة قوة كبح للانخلاعات ( الانزلاقات ) المتحركة.

تستخدم ألياف متمتين من البورون أو الزجاج أو الكربون أو ألياف عضوية أو ألياف على أساس بلورات خيطية ( من الأكاسيد أو الكرييدات أو البوريدات أو النتريدات ) وكذلك يمكن استخدام ألياف معدنية ( أسلاك ) . تتواجد عناصر التسليح المستمرة على شكل خيوط ملفوفة أو غير ملفوفة أو حزم أو أسلاك أو نسيج، وكذلك ألياف قصيرة على شكل مساحيق أو نسيج أو حصير. تنحصر خاصية بنية التركيبية الليفية في التوزيع المنتظم للألياف عالية المتانة في الحاضن اللدن. ويكون الاحتواء الحجمي لعنصر التمتين في المواد الموجهة في حدود 20-30% . وتزداد متانة وجساءة المادة المركبة بزيادة متانة ومعامل مرونة الألياف المستخدمة.

تُحدد مادة الحاضن متانة التركيبية على القص والضغط وكذلك مقاومة الانهيار التعب. وترتفع متانة تلاحق الحاضن مع الألياف عن طريق المعالجة السطحية للألياف وذلك بترسيب بلورات خيطية على سطح الألياف، وهذا يؤمن رفع متانة المادة على القص بـ 1.5-2 مرة ويزيد معامل المرونة على القص والمتانة على الضغط بـ 40-50%. يعتبر المحتوى الأمثل للطور المتشنت 2-4% في المواد المقوية تشنتياً. وتتميز الجسيمات المتشنتة في هذه المواد عن الألياف بأنها تشكل متانة غير مباشرة، أي أنه وبسبب وجود هذه الجسيمات تستقر البنية المتشكلة عند المعالجة الحرارية. والخاصة الأخرى المميزة لبنية التركيبية الليفية هي تباين الخواص باختلاف الاتجاه والمرتبطة بالتوضع المميز للألياف في هذا أو ذاك الاتجاه. أما المواد المقوية تشنتياً فتتملك خواص واحدة في كل الاتجاهات وذلك بسبب أن الجسيمات المتشنتة لها شكل منتظم المحاور.



#### 10-4 المواد المركبة المعدنية:

تنتمي إلى المواد المركبة المعدنية كل المعادن المقساة بألياف مستمرة أو متقطعة وكذلك بالجسيمات. ويكون المعدن الحاضن عادة من الألمنيوم والمغنيسيوم والتيتانيوم والنيكل والخلائط الخاصة؛ أما مادة الألياف فتكون من البورون والكربون والتتغستين وأكاسيد صعبة الانصهار وكربيدات ونتريدات وألياف ناعمة من الفولاذ عالي المتانة. ويمكن أن تكون كمية التسليح حوالي 10 ÷ 60 % . ويبين الجدول رقم 1-10 بعض مواد التسليح وخواصها.

تتمتع المواد المركبة المعدنية بالمقارنة مع المواد المركبة البوليمرية بالمميزات التالية:

- درجة حرارة استثمار أعلى
- قيمة أعلى لمعامل المرونة الأول ولمعامل القص عند تسليح باتجاه واحد
- معامل ناقلية حرارية وكهربائية أعلى بكثير
- مقاومة للإشعاع
- ثبات بالمقاييس
- انعدام امتصاص الماء وانبعاث الغازات

أما السيئات الأساسية للمواد المركبة المعدنية فهي صعوبة تكنولوجيا التحضير وارتفاع قيمة هذه التكنولوجيا. فإذا اعتبرنا قيمة الفولاذ المدلفن على الساخن واحد فتكون قيمة المواد المركبة المعدنية نظام Al-SiC حوالي 600 ولنظام Al-B أكثر من 1800 . وغالباً ما تكون المواد المركبة المعدنية هي Al-SiC و Al-C وأكسيد - Al . تبدي المواد المركبة المعدنية على أساس الألمنيوم والمسلحة بعناصر متقطعة من كربيد السيلكون كثافة قليلة وسمات نوعية عالية مثل المتانة وجسوءة عند التلامس وعند درجات حرارة عالية والمعامل الخطي للتمدد الحراري منخفض. وبالمقارنة مع خلائط الألمنيوم عالية المتانة يكون حد

السيولة والمتانة ومعامل المرونة للمواد المركبة المعدنية أكبر بـ 1.5 مرة، وتكون مقاومة الاهتراء قريبة لمقاومة اهتراء الفولاذ.

نحصل على المواد المركبة المعدنية بالطرق التالية: السكب تحت الضغط، التشريب القسري، ميتالورجيا المساحيق، الترسيب البلازمي، البثق، التطريق، السحب والدرفلة، الكبس في درجات حرارة عالية، اللحام بالتفجير، المعالجة الحرارية الميكانيكية. وهناك صعوبة بالتشغيل الميكانيكي للمواد المركبة المعدنية بسبب قساوتها العالية، ويحضر من هذه المواد أنابيب وصفائح وقطع مختلفة وحلقات وصل جنازير الدبابات وكابس محركات السيارات.

تبدى المواد المركبة المعدنية على أساس الألمنيوم ( حاضن من الألمنيوم )، المسلحة بألياف عالية المتانة من الكربون، مقاومة عالية وجساءة وناقلية حرارية وكهربائية وكثافة منخفضة. ويسمح إدخال جسيمات متشتتة من الغرافيت في خلاط الألمنيوم برفع الخواص التريبولوجية خاصة خمد الاهتزازات، ولكن الذي يحد من الاستخدام الواسع لهذا النظام هو مقاومة التآكل المنخفضة. وتحضر المواد المركبة المعدنية ذات حاضن من الألمنيوم ومسلحة بألياف من الكربون بطرق الأطوار الصلبة والسائلة وكذلك الكبس على الساخن والبثق.

الجدول رقم 1-10 بعض مواد التسلح وخواصها

| الحافض                     | E<br>GPa | $\sigma_B$<br>MPa | D $\mu m$ | $\rho$<br>kg/m <sup>3</sup> | مادة التسلح                    |
|----------------------------|----------|-------------------|-----------|-----------------------------|--------------------------------|
| خلاتط Al, Mg, Ti, بوليمرات | 400      | 3500              | 100-150   | 2600                        | B - ألياف                      |
| خلاتط Al, Mg, Ti, بوليمرات | 400      | 3150              | 100-150   | 2700                        | B-SiC                          |
| خلاتط Al, Mg, Ti           | 400      | 2800              | 100       | 3200                        | متعدد البلورات SiC             |
| خلاتط Al, Mg               | 500      | 3700              | 0.2-1     | 3500                        | أحادي البلورات SiC             |
| خلاتط Al                   | 400      | 2460              | 70        | 2700                        | BC                             |
| خلاتط Al, Ni, Ti           | 250      | 2460              | 250       | 4000                        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| Al ، بوليمرات              | 450      | 3000              | 5-10      | 1700                        | ألياف C                        |
| Al-Mg-Ti                   | 300      | 1400              | 100-250   | 1800                        | Be                             |
| SAP, AMg6                  | 120      | 4200              | 100-150   | 7000                        | فولاذ BHC-9                    |
| Ni, Co, Cr                 | 410      | 1200              | 380       | 19000                       | W+2%ThO <sub>2</sub>           |
| Ni, Co, Cr                 | 330      | 600               | 130       | 10000                       | Mo                             |

يجرى حساب المواد المركبة الليفية على المتانة بافتراض أن الليف وبشكل متساوي متوضع في حجم الحاضن ومتجانس ومتصل مع الحاضن بقوة ولا يوجد على السطح الفاصل بين الليف والحاضن أي انزلاقات. في هذه الحالة تنقسم الحمولة بين الليف والحاضن:

$$P_{cm} = P_{mat} + P_{fib}$$

وتشوه المركب ( الليف والحاضن ) واحد:

$$\epsilon_{cm} = \epsilon_{mat} + \epsilon_{fib}$$

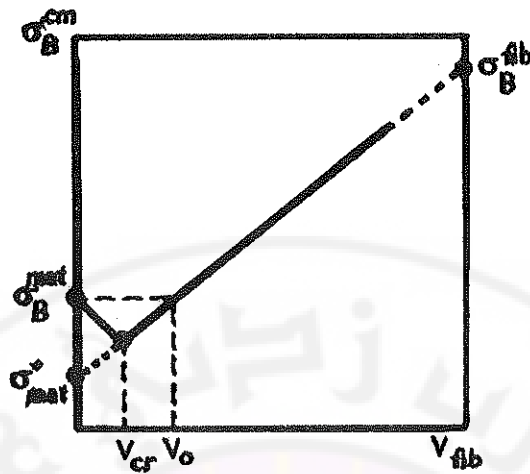
يبين الشكل 2 علاقة متانة المواد المركبة بكمية الألياف. عند قيمة منخفضة لنسبة الألياف  $V_{fib}$  تكون متانة المادة المركبة أخفض من متانة الحاضن بسبب أن الألياف تحمل بسرعة حتى الإجهادات الحدية وتتهار. وابتداءً من  $V_{cr}$  ترتفع متانة المادة وتصل عند  $V_{fib} = V_0$  إلى متانة الحاضن. وعند تركيز  $V_{fib} > V_0$  ترتفع متانة المادة المركبة بسبب أن

$$\sigma_{B\ cm} > \sigma_{B\ mat}$$

ويكتب قانون ارتفاع المتانة بالمعادلة:

$$\sigma_{B\ cm} = \sigma_{B\ mat} V_{mat} + \sigma_{B\ fib} V_{fib}$$

حيث قيمة  $\sigma_{B\ mat}$  محدد على الشكل 10-2 وتقريباً تساوي حد الانسياب للحاضن.



الشكل 10-2

علاقة متانة المواد المركبة الليفية بنسبة الألياف

عند نسبة حجم  $V_{fib} \geq 80\%$  تنخفض الخواص الميكانيكية للمادة المركبة بسبب أن الحاضن ليس قادراً على مسك كل ليفة، وتنخفض كذلك تلاصق الألياف مع الحاضن وتظهر انزلاقات في البنية. لهذا في المواد المركبة المعدنية تكون كمية الألياف محدودة. وتحسب نسب تقسيم الحمولة بين الألياف والحاضن في المادة المركبة المعدنية بالعلاقة:

$$\frac{P_{fib}}{P_{mat}} = \frac{E_{fib} \times V_{fib}}{E_{mat} \times V_{mat}}$$

تبين هذه المعادلة أن الحمولة على الألياف أكبر كلما كان معامل مرونتها أكبر بالمقارنة مع معامل المرونة للحاضن، وكذلك كلما زادت الحصة الحجمية للألياف في المادة. فعلى سبيل المثال، عند تسليح الألمنيوم ( $E = 70 \text{ GPa}$ ) بألياف كربونية ( $E = 450 \text{ GPa}$ ) بنسبة  $V_{fib} = 0.5$  فإن الحمولة تتوزع كما

يلي:  $P_{fib} / P_{mat} = 6.5 / 1$  وهذا يعني أن النسبة الكبرى من الحمولة تأخذها الألياف..

يجري تشوه المادة المركبة الحاوية على ألياف متوضعة طولياً على أربعة مراحل:

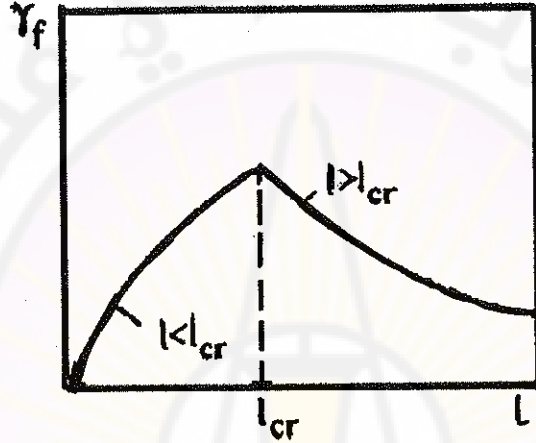
1. تتشوه الألياف والحاضن تشوهاً مرناً
  2. تتشوه الألياف تشوهاً مرناً والحاضن تشوهاً لدناً
  3. تتشوه الألياف والحاضن تشوهاً لدناً ( إذا كانت الألياف هشّة فإن هذه المرحلة تختفي )
  4. تنهار الألياف وهذا يؤدي إلى انهيار المادة المركبة.
- تقع الحمولة الأساسية في المواد المركبة الليفية على الألياف ويكون دور الحاضن فقط إيصال الحمولة وتوزيعها على الألياف. يعتبر انهيار المواد المركبة عملية فيزيائية معقدة يعتمد نموها على بنية المواد وسرعة التشوه وسمّة الإجهادات المطبقة ودرجة الحرارة وعوامل أخرى. يبدأ أي انهيار للمادة المركبة بنشوء ونمو شقوق ميكروية. وتعتمد مقاومة انتشار هذه الشقوق بشكل متباين على اتجاه توضع الشق بالنسبة لتوضع الألياف. ومقاومة انتشار الشقوق باتجاه الألياف أقل بكثير من الاتجاه العرضي وذلك بسبب أنه في الحالة الأولى للعمل يحدد انهيار المادة المركبة بخواص الحاضن أو سطح الفصل، أما في الحالة الثانية في فيصرف قسم من الطاقة على انهيار الألياف ويمكن أن تكون كبيرة. هناك ثلاثة آليات لتسريب الطاقة عند تحرك الشقوق في المواد المركبة الليفية:

1. العمل المبذول على التشوه اللدن للحاضن  $A_m$
2. العمل المبذول على تحرك الألياف في الحاضن  $A_f$
3. العمل المبذول على انهيار الاتصال على السطح الفاصل  $A_e$

وسيكون العمل الكلي لانهايار المادة المركبة يساوي:

$$A_{cm} = A_m + A_f + A_e$$

ويبين الشكل 3-10 علاقة العمل المبذول لانهايار الألياف المقوية بطول  $l$ .  
وتبدي المواد المركبة المسلحة بألياف بلورية بطول  $l_{cr}$  العمل الأعظمي  
للالنهايار.



الشكل 3-10

علاقة العمل المبذول على انهيار المادة المركبة بطول ألياف التسليح

يستخدم لتسليح المواد المركبة المعدنية ذات أساس من الألمنيوم وألياف  
من أكاسيد الألمنيوم والسليكون وكذلك ألياف من سيليكات الألمنيوم. وتملك هذه  
المواد معامل مرونة عالي وكذلك مقاومة إهتراء وتحافظ بالمتانة عند درجات

حرارة عالية، أما من ناحية الناقلية الحرارية فهي قريبة من الناقلية الحرارية للألمنيوم غير المسلح.

يحضر من المواد المركبة المعدنية ذات أساس من خلائط الألمنيوم المسلحة بألياف من أكسيد الألمنيوم قطع محركات الاحتراق الداخلي ( مثل أنرع التوصيل ). ويؤدي استخدام هذه المواد إلى خفض الحمولات المحورية في المحرك وتقليل استهلاك الوقود وتحسين جودة عمله. كما يستخدم لصناعة قطع مقاومة للإهتراء الحكي مواد معدنية من خلائط الألمنيوم مصبوبة مع جسيمات صلبة من السيليكا، حيث يضاف الرمل المنظف والمنخل في خليط الحاضن ويحرك بشدة ويسكب المعلق في قالب معدني.

وجدت المواد المركبة المعدنية من الألمنيوم المسلح بألياف سيراميكية استخدامات واسعة في بناء الطائرات. كما يصنع من المواد المركبة Al-B , Al-Be معظم القطع الأساسية في الجهاز الفضائي أطلس، وكذلك قطع حجرة التمرير لأجهزة التفجير الفضائية وعناصر أجهزة التحميل في المراكب الفضائية. كما يؤدي تغير مادة العضد ( القطعة الأساسية الحاملة لجسم الطائرة ) من مواد معدنية إلى مواد مركبة معدنية من Al-B إلى خفض في وزنه بحوالي 30%. وتعتبر المواد المركبة المعدنية نظام ألمنيوم - بورون ذات مستقبل عند تصميم الأجهزة الطائرة وخاصة العناصر الجاسئة مثل: الأجزاء الهيكلية والعضد والعوارض الطولية وإطارات الهيكل وغيرها. حيث أن الطائرة من طراز S3A ذات الجناح الذي يدخل في تصنيعه مواد نظام ألمنيوم - بورون اجتازت اختبار تحميل أكثر بمرّة ونصف من الحمولة المسموح بها للتصميم بالمقارنة مع المواد الكلاسيكية. وصنعت الأجزاء الهيكلية في الطائرة F-111 من مواد مركبة معدنية نظام Al-B/Si .

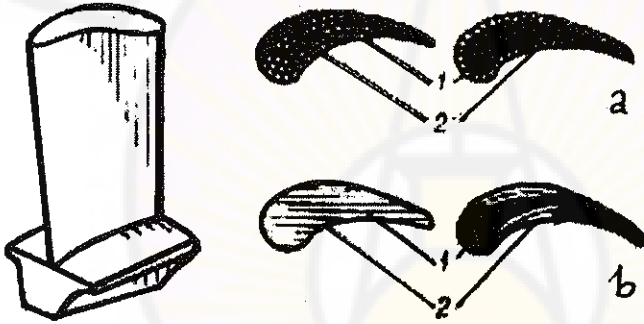


يستخدم بالإضافة للألمنيوم حواضن من المغنسيوم وسبائكها، ويسلح بجسيمات متشتتة من  $Al_2O_3$  و  $SiC$ . وتدخل مادة التسلح في الحاضن وهو في الحالة السائلة. ومع زيادة حجم  $SiC$  يزداد معامل المرونة والمتانة على الشد وتنقص لدونة المادة. وتتصف المواد من خلائط المغنسيوم والتي تحتوي على 1-3% جسيمات متشتتة من  $Al_2O_3$  إلى رفع مقاومة الإهتراء. إن السيئة الرئيسية لقطع الطائرات المصنعة من مواد أساسا الألمنيوم أو المغنسيوم هي المقاومة غير العالية للحت عند تأثير الجسيمات الغريبة وصدمها مع مواد أخرى.

تسلح المواد المركبة من التيتانيوم وخلائطه بألياف من البورون وكربيد السليكون وأكسيد الألمنيوم والبريليوم والمولبيديوم. وأكثر الأنظمة شهرة هي  $Ti-B-SiC$  و  $Ti-Be$  و  $Ti-SiC$  وتتمتع هذه الأنظمة بخواص ميكانيكية وفيزيائية عالية. وعلى سبيل المثال يكون للمادة BT6 المسلحة بالبريليوم:  $E = 170 \text{ GPa}$ ,  $\sigma = 110 \text{ MPa}$  أما للمادة BT6-1 المسلحة بكربيد السليكون  $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $\sigma = 910 \text{ MPa}$ . وبيئت التطبيقات الكثيرة أن المواد المركبة المعدنية من التيتانيوم لها مقاومة عالية للحت عند تأثير الماء والجليد والرمل، ولهذا يمكن استخدام مثل هذه المواد لتحضير ريش ضواغط محركات الطائرات. ولقد نجحت محركات من نوع TF-41 وتعديلاتها والتي تحتوي ريش ضواغط مصنعة من مواد نظام  $Ti-Be$  واجتازت عدة اختبارات.

أدخلت المواد المركبة في تصاميم قطع توربين المحركات الغازية التوربينية. وتملك الريش العاملة في توربين محركات الطائرات الحديثة تصاميم تبرد بالماء أو الهواء. ويؤدي استخدام المواد المركبة المعدنية المقاومة للحرارة إلى رفع درجة الحرارة المسموح بها لعمل التوربين وبالتالي ينخفض استهلاك المبردات وكذلك خفض عدد المراحل ورفع عدد دورات التوربين وخفض كتلة

المحرك. من هذه المواد النيكل وخليئته المسلحة بألياف من البورون والرنيوم وأكسيد الثوريوم وأكسيد الألمنيوم. ويصل حد المتانة عند تسليح النيكل بألياف من البورون إلى  $\sigma_B = 2700 \text{ MPa}$ . أما متانة النيكل المسلح بألياف من التنغستن فتصل إلى  $\sigma = 380 \text{ MPa}$  عند درجات حرارة  $1200^\circ \text{C}$ . وتحدد المتانة العالية عند درجات حرارة مرتفعة للمواد المركبة النيكالية مجال استخدامها في القطع الساخنة للمحركات التوربينية الغازية (مثل الريش العاملة والنفثة وغرف الاحتراق وصمام الوقود). ويبين الشكل 4-10 مخطط تسليح الريش ذات التركيب الليفي والطبقي عند التسليح الكامل أو الجزئي في المناطق الحساسة.



الشكل 4-10

مخطط تسليح الريش

a- بنية ليفية، b- بنية طبقية

1- المادة الأساسية، 2- عناصر التسليح

### المواد المركبة الـيوتكتيكية:

هي أنواع مختلفة من المواد المركبة الـيفية التي نحصل عليها في عمليات التبلور الموجه لليوتكتيك وتتشكل بنية غير متجانسة في اتجاه توضع الأطوار. لا تظهر عند تحضير المادة المركبة الـيوتكتيكية مشكلة في ترابط الألياف والحاضن لأنه عند توجيه تبلور الخليطة أو التفاعل يجري فرز الأطوار المقساة من الحاضن في عملية التبلور الطبيعية والتي فيها تلاصق الطور المقسى مع الحاضن عالي. وبعد الاستقرار الحراري العالي من أهم خواص المواد المركبة الـيوتكتيكية. ولهذا بقيت بعض العينات من الأنظمة  $Al-CuAl_2$ ,  $Al-Al_3Ni$ ,  $Cr-Cr$  مستقرة مئات الساعات في درجات حرارة أقل بـ  $600^{\circ}C$  من درجة حرارة انصهارها دون تكور أو أي انهيار. وأفضل المواد المركبة الـيوتكتيكية هي التركيبات  $(Co,Cr)-(Co,Cr)_7C_3$  المحضرة بطريقة التبلور الموجه في نموذج منصهر سيراميكي لريشة ضاغط والتي متانتها تفوق متانة خلأط النيكل المقاومة للحرارة.

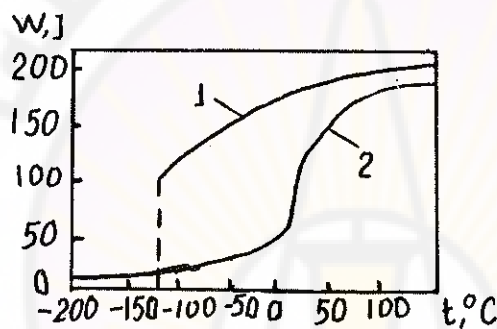
### المواد المركبة المعدنية الصفائحية:

تتألف هذه المواد من صفيحتين أو أكثر من مواد مختلفة متصلة ببعضها البعض برابطة متينة. وتتمتع هذه المواد بمقاومة عالية للتآكل والإهتراء ومقاومة صدم وخصائص حرارية كهربائية جيدة. وتوجد عدة طرق للحصول على المواد المركبة الصفائحية أهمها وصل الصفائح بالدرفلة أو الضغط أو اللحام أو التفجير.

تسبدي المواد المركبة المعدنية الصفائحية ( التي فيها متانة الاتصال أو المتانة بين الصفائح أقل منها للعناصر الأساسية ) مقاومة عالية لانتشار الشقوق بالمقارنة مع المواد وحيدة الصفائح، وهذا يتعلق بآلية انهيار المادة. فعند انتشار الشقوق بشكل عامودي على الطبقات يجري فرملتها على حدود الفصل بين

الصفائح نتيجة عملية انشطار قمة الشق لهذا يحدث إزالة إجهادات. في حالة انتشار الشقوق بشكل موازي للطبقات يحدث انشطار الطبقة عند الشق ويحدث تشعب للشقوق. وهذا أيضاً يخفض الإجهادات في قمة الشق. تنخفض فجأة درجة حرارة الانتقال من الحالة المرنة إلى الحالة الهشة في المواد المركبة الصفائحية، وهذا مبين في الشكل 5-10 .

تجدد المواد المركبة الصفائحية استخداماً في الطيران وبناء الصواريخ والمركبات الفضائية والمفاعلات النووية.



الشكل 5-10

علاقة طاقة الانهيار بدرجة الحرارة

1- للمواد المركبة نظام فولاذ-سبيكة قاسية

2- للفولاذ

## 10-5 المواد المركبة البوليمرية:

تتصف المواد المركبة البوليمرية بالمتانة النوعية والجساءة العالية والقيمة المنخفضة لمعامل التوسع الحراري والاحتكاك، ومقاومة اهتراء عالية ومقاومة تأثير الأوساط الفعالة وعازلية للإشعاع ومقاومة للصدم الحراري والإشعاعي وسهولة التصنيع.

يستخدم في المواد المركبة البوليمرية حاضن من مواد بلاستيكية مثل البولي أثير والإيبوكسي والراتنج الفينولي وغيرها، وكذلك بلاستيك حراري مثل البولي سلفون والبولي فينيل سلفون والبولي أثير سلفون وغيرها. تستطيع كل من ألياف التسليح المتنوعة والروابط البوليمرية وكذلك مخطط التسليح التحكم بخواص هذه المواد وخاصة ما يتعلق بخواص وظروف عمل المادة. ويمكن تقسيم هذه المواد حسب طرق التسليح إلى مجموعتين أساسيتين:

1- مواد مركبة بوليمرية مسلحة بألياف مستمرة متوازية؛

2- واد مركبة بوليمرية مسلحة بأقمشة.

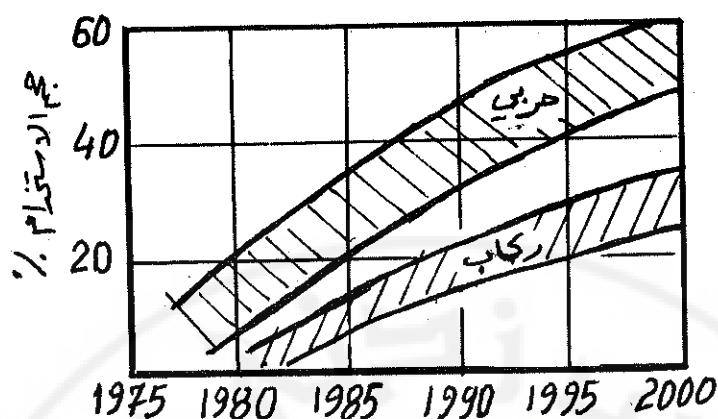
وأوجد لأول مرة النظام الليفي متعدد الطبقات الذي فيه كل طبقة تتألف من حزمات وحيدة الاتجاه وأسلاك متوضعة بشكل متناسب. ويستخدم لتسليح الدائن الحرارية ألياف غرافيتية وكربونية وزجاجية. وتعتبر المركبات التالية أكثر شيوعاً:

المواد المركبة البوليمرية ذات الألياف الكربونية:

تسمى هذه المواد أحياناً بالبلاستيك الكربوني وهي مركبات تتألف من حاضن بوليمري وتسليحات بشكل ألياف كربونية. ونحصل على الألياف الكربونية بالمعالجة الحرارية للألياف العضوية. وبالاعتماد على درجة حرارة المعالجة الحرارية وكمية الكربون في الليف يمكن تقسيم العمليات إلى: الكربنة الجزئية ( 900°C, 85-90% ) والكربنة ( 900-1500°C, 90-95% )

والغرفة (  $1500-3000^{\circ}\text{C}$ ,  $>99\%$  ). ويمكن أن تكون الألياف على شكل خيوط ولغائف لباد ونسيج. وتتملك الألياف الكربونية العادية الخصائص التالية:  $\sigma_B=50-100\text{kg/mm}^2$ ,  $E=2000-7000\text{kg/mm}^2$  وللألياف عالية المتانة:  $\sigma_B=150\text{kg/mm}^2$ ,  $E=15000\text{kg/mm}^2$ . وبالاختلاف مع الألياف الزجاجية فإن الألياف الكربونية تتبلل بصورة سيئة بمادة الحاضن ( طاقة سطحية منخفضة )، ولهذا تتعرض لعملية التخریش وطلاء. ويستخدم البوليمر الصناعي والكربون البيرليني كمعاد مربوطة ويستخدم الإيبوكسي والبولي أميد كمعاد رابطة بوليمرية.

تبدى الألياف الكربونية قوة تحمل ديناميكية واستاتيكية عالية وثبات في المياه والمواد الكيميائية ومقاوم لأشعة X. ويؤدي استخدام الألياف الكربونية لتقوية الإنشاءات ثلاثية الطبقات للعناصر السطحية لموجهات الطائرات ( الدفة، قلابه الأجنحة، ألواح الفرملة، مصارع الفتحات وغيرها ) إلى خفض الوزن بمقدار 12-40%، أما استخدام الألياف الكربونية لأجزاء الساحة وحواجز طائرة الركاب فيؤدي بالإضافة لتحسين الراحة في صالة الطائرة على حساب خفض الاهتزاز ومستوى الضجيج كذلك يخفض الوزن إلى 20-30%. كما يمكن استعمال هذه المواد في الإنشاءات القوية التي تتحمل ضغوط مرتفعة. ويبين الشكل 6-10 نسب استخدام المواد المركبة في صناعة الطائرات المدنية والعسكرية في العالم.



الشكل 10-6

حجم استخدام المواد المركبة البوليمرية في بناء الطائرات

#### المواد المركبة البوليمرية ذات الألياف البورونية:

هي عبارة عن مركب من بوليمر ممتن بألياف من البورون. ويستخدم الراتنج الإيبوكسي والبولي أميدي كبوليمرات رابطة. أما ألياف البورون فتتشكل بعملية ترسيب البورون من الطور الغازي على سطح مسخن من أسلاك التنغستين. وتتألف الطبقة الانتقالية بين التنغستين والبورون من بوريد التنغستين. وعند درجة حرارة أعلى من  $400^{\circ}\text{C}$  تتأكسد الألياف ويمكن تغليف الألياف البورونية بخيوط زجاجية تؤمن استقرار شكل الليف.

تتمتع هذه المواد بالمتانة العالية والثباتية ضد المواد المشعة والماء والمحاليل العضوية والمحروقات المختلفة. وتستخدم هذه المواد في صناعة الجوائز الإنشائية والهياكل والعوارض الطولية في هياكل الطائرات والريش

وأعمدة النقل في الحوامات وذلك لما تبدي هذه المواد من جسوة نوعية ومثانة عند تأثير الإجهادات الضاغطة.

### المواد المركبة البوليمرية ذات الألياف العضوية:

وهي المواد التي تتألف من روابط بوليمرية وتقوية على شكل ألياف تركيبية مثل الألياف المرنة (كبرون أو نايلون، لايسان، نترون) والألياف القاسية (فينول، بولي أميد على شكل فتايل وضمائر وأقمشة). ويستخدم كرابط راتنج يتصلب حرارياً (مثل الإيبوكسيد، بولي أميد، فينولفراميد).

تتصف هذه المواد بخفة الوزن ومثانة نوعية وجساءة نوعية عاليتين وثبات عند تأثير حمولات مختلفة الإشارة وكذلك التغيير المفاجئ في درجة الحرارة. أما السيئة الرئيسية لهذه المواد فهي المثانة المنخفضة على الضغط والزحف المرتفع. وتهمل هذه المواد عادة في مجال حراري  $100-150^{\circ}\text{C}$  ولكن بعضها يستطيع أن يعمل في مجال حراري  $200-300^{\circ}\text{C}$  مثل المواد ذات أساس بولي أميد. وتمتاز هذه المواد بالخواص الفيزيائية المبينة في الجدول 10-2.

الجدول 10-2 خواص المواد المركبة ذات الألياف العضوية

| الصفة                                              | $E, \text{kg/mm}^2$ | $\sigma_B, \text{kg/mm}^2$ | $\gamma, \text{g/cm}^3$ |
|----------------------------------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------|
| المواد ذات الألياف العضوية                         | 250-800             | 10-19                      | 1.15-1.3                |
| المواد ذات الألياف العضوية مع تقوية من ألياف قاسية | 3500                | 65-70                      | 1.2-1.4                 |



## 10-6 المواد المركبة الكربونية:

تعمل المواد المركبة البوليمرية في درجات حرارة حتى  $200-250^{\circ}\text{C}$  ويحدث عند درجات حرارة أعلى من ذلك انحلال سريع للبوليمر. أما المواد المركبة الكربونية فلها خاصية العمل الطويل في الأوساط المرجعة والخاملة حتى درجات حرارة  $3000-3500^{\circ}\text{C}$  وفي الأوساط المؤكسدة حتى درجة حرارة  $350-400^{\circ}\text{C}$  ، حيث أن خواص المتانة لا تنخفض بارتفاع درجة الحرارة وإنما تزداد.

تتكون العملية التكنولوجية لتحضير المواد المركبة الكربونية من إنشاء هيكل يدخل فيه حاضن من مواد مشكلة للكربون ويتبعه معالجة حرارية حتى تحول هذه المادة إلى كربون. ويجرى تحضير الهيكل بطرق مختلفة وأكثر الهياكل انتشاراً هي الهياكل المصنعة بالتخليق الدفعي للأنسجة التي تتم تغطيتها بقماش ملفوف وحزمة من القلوب المخلقة بشكل عامودي على الطبقات. كما تستخدم بشكل واسع أيضاً نسيج من الخيوط الجافة التي تستخدم لتحضير هياكل ثلاثية الأبعاد وذات شكل معقد. تصل الكثافة حتى  $0.9-10^3\text{kg/m}^3$ .

تعتبر المرحلة الأكثر صعوبة في العملية التكنولوجية هي تأسيس الحاضن الكربوني. ويمكن تحقيق هذه المرحلة بطريقتين: إشباع من مواد تحتوي الكربون وتتلوها كربنة متعددة الدورات مثل الترسيب من الطور الغازي. ويستخدم كمركب يشكل الكربون رايتنج من الفينول وكذلك الزفت النفطي أو الفحم الحجري. يحضر الحاضن الكربوني أيضاً بطريقة الترسيب من الطور الغازي عن طريق التفكك الحراري للغازات الحاوية على الكربون مثل الغاز الطبيعي والميثان وغيره.

استخدمت المواد المركبة الكربونية أول مرة في صناعة الألواح الحرارية في السفن الفضائية العائدة ( المكوك الفضائي ) وأيضاً حماية رؤوس

الصواريخ. وكذلك استخدمت في صناعة فوهات وحجرات الاحتراق في محركات الصواريخ. ويعتقد أن تلقى هذه المواد في المستقبل استعمالاً واسعاً في الطب، حيث تتمتع بتوافق بيولوجي مع الخلايا البشرية وخاصة أن قيمة معامل المرونة والكثافة قريبة من مادة العظم البشري.

#### 7-10 المواد المركبة التريبولوجية:

تنتمي إلى هذه المجموعة كل المواد التي تعمل في ظروف الاحتكاك وتقسم إلى مجموعتين مواد احتكاكية ومواد مقاومة للاحتكاك.

##### المواد الاحتكاكية:

تستخدم المواد الاحتكاكية في المكابح متعددة الأقراص وفي القارنات القرصية والمنظمات الاحتكاكية. وتعمل المواد المركبة الاحتكاكية في مجال واسع من السرعات والحمولات ودرجات الحرارة. حيث تتغير سرعة الانزلاق من بضعة سنتيمترات في الثانية إلى 50 متر في الثانية، وتتغير الحمولة من عشرات الأطنان إلى عشرات الغرامات. ويمكن أن ترتفع درجة الحرارة بشكل مفاجئ إلى  $1000^{\circ}\text{C}$ . ويجب أن تتمتع المواد المركبة الاحتكاكية بمعامل احتكاك عالي ومستقر واهتراء أصغري وناقلية حرارية عالية واستقرار حراري وقابلية جيدة للتشغيل ومتانة كافية.

يجري اختيار المواد المركبة الاحتكاكية على أساس درجة حرارة التسخين السطحي والضغط الأعظمي الذي تتحمله. ونستخدم لنظام الاحتكاك الخفيف ( $t < 200^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\max} < 0.8\text{MPa}$ ) والمتوسط ( $t < 400^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\max} = 1.5\text{MPa}$ ) مواد مركبة غير معدنية. وتكون الرابطة فيها راتينج وكاوتشوك أما مواد التعبئة فهي الاسبست. ويضاف النحاس والألمنيوم والرصاص والأتون لرفع الناقلية الحرارية، كما يضاف الغرافيت لمنع الجمود

وتضاف أكاسيد وأملاح لرفع معامل الاحتكاك. تعتبر مادة الاسبست الاحتكاكي ( ريتنكس ) من المواد المركبة غير المعدنية ذات فعالية العمل العالي ويحتوي على 25% راتينج ( من فينول-فورماغيد ) و 40% اسبست و 30% باريت  $BaSO_4$  ولاتون مقطع وملدنات. ويصل معامل الاحتكاك عند احتكاك ريتنكس مع الفولاذ إلى 0.37-0.40 . أما مساوي المواد غير المعدنية فهي الناقلية السيئة للحرارة والذي يسبب ارتفاع درجة الحرارة وانهيار المادة. يستخدم عند نظام احتكاك ثقيل (  $t < 1200^{\circ}C$ ,  $P_{max} \leq 6MPa$  ) مواد مركبة معدنية أساسها الحديد أو النحاس.

#### المواد المقاومة للاحتكاك:

تتصف هذه المواد بمعامل احتكاك انزلاقي منخفض والذي يؤمن ضياع منخفض للاحتكاك وسرعة اهتراء منخفضة للعقد الاحتكاكية. ويجب أن تتمتع مادة المحامل من أجل مقاومة الاحتكاك بالخواص التالية:

1. ناقلية عالية للحرارة
2. قابلية جيدة للتبلل بمادة التزيت
3. قابلية تشكيل طبقة رقيقة على سطح المادة
4. قابلية تشغيل جيدة التي تعطي المادة عند الاحتكاك تشوه طفيف وسهل ويوسع مساحة الاتصال ويؤدي ذلك إلى خفض الضغط المحلي وقابلية التحميل.

إن معيار تقييم مادة المحامل هو معامل الاحتكاك وسمات الحمل والسرعة: الضغط  $p$  الذي يؤثر على زوج الاحتكاك، سرعة الانزلاق  $v$  ، المعامل  $pv$  الذي يحدد الاستطالة النوعية للاحتكاك. فكلما ارتفعت قيمة المعامل  $pv$  كلما زادت قابلية المادة لخفض درجة حرارة التسخين وحمولة الاتصال وكذلك حفظ طبقة الزيت الحدودية. ويعتبر معامل الاحتكاك الأصغري ومقاومة

الاهتراء العالية الخواص الأساسية المطلوبة من المواد المقاومة للاحتكاك. وتحدد هذه الخواص الضياع الأصغري للطاقة في العقد الاحتكاكية ومدة الخدمة العالية. ولتحقيق هذه المتطلبات تستخدم خلائط عديدة من مواد مركبة ومسحوقية ذات حواضن معدنية وبوليمرية. ويجب أن تتميز المواد المركبة المقاومة للاحتكاك من مواد بوليمرية بالوثوقية ومدة الخدمة الطويلة والوزن الأصغري وتكلفة منخفضة، ويبين الجدول 3-10 صفات المواد التريبولوجية البوليمرية.

الجدول 3-10 صفات المواد التريبولوجية البوليمرية

| المادة                        | معامل الاحتكاك |           | الاهتراء النسبي |
|-------------------------------|----------------|-----------|-----------------|
|                               | الستاتيكي      | الحركي    |                 |
| بولي أميد                     | 0.25-0.2       | 0.30-0.25 | 200             |
| بولي فورمليد                  | 0.15           | 0.20      | 65              |
| بولي فتور إتلين<br>الثلاثي    | 0.10           | 0.15      | 8               |
| بولي كربونات                  | 0.30           | 0.40      | 2500            |
| بولي أوريتان                  | 0.30           | 0.40      | 3400            |
| ستيروأكرليك                   | 0.30           | 0.35      | 3000            |
| مركب أساس من<br>راتينج فينولي | 0.20-0.15      | 0.26-0.25 | 30              |

## الفصل الحادي عشر

### المواد السيراميكية ذات الاستخدام العددي والإنشائي

#### 1.11 مقدمة

#### 2.11 المواد السيراميكية ذات الاستخدام العددي

#### 3.11 المواد السيراميكية ذات الاستخدام الإنشائي

#### 4.11 المواد عالية الخزفية



## المواد السيراميكية ذات الاستخدام العددي والإنشائي

### 1-11 مقدمة:

بدأت منذ الخمسينات الأبحاث التي تتناول استخدام أنواع مختلفة من السيراميك في تحضير أدوات قطع الفولاذ، وفي الوقت الحاضر يستخدم أكسيد الألمنيوم الذي يمتلك مقاومة عالية جداً للاحتكاك وله خاصية تحمل سرعات القطع العالية ، ومنذ ذلك الوقت وعندما يتم التحدث عن أدوات القطع السيراميكية فإنه يقصد بذلك أداة القطع من أكسيد الألمنيوم وتسمى هذه المادة بالسيراميك المعدني . ينحصر استخدام المواد السيراميكية كمواد إنشائية في مجال ضيق وذلك لهشاشيتها وصعوبة التشغيل الميكانيكي وميولها للصدم الحراري. فمنذ السبعينات بدأت في الدول المتطورة أبحاث في الحصول على مواد إنشائية ذات درجات انصهار عالية من أجل تصنيع قطع للتوربينات الغازية ومحركات الاحتراق الداخلي وفي تقنيات الصواريخ الفضائية وغيرها.

### 2-11 المواد السيراميكية ذات الاستخدام العددي:

يستخدم السيراميك المعدني للخراطة النصف نهائية والنهائية للمشغولات من الحديد الصلب الرمادي والمطروق وعالي المتانة والمصلد ومن الفولاذ المقسى والمحسن ومن بعض المعادن الملونة والخلائط وغيرها، وذلك عند سرعات قطع عالية (  $800 \div 600 \text{ m/min}$  ) وبدون استخدام سوائل تبريد ، ويستخدم أيضاً في قوالب سحب الأسلاك من المعادن الملونة وكذلك

لتحضير قطع الآلات المقاومة للإهتراء التي تتعرض أثناء عملها لإهتراء وحك بدون صدم.

ويتكون السيراميك المعدني الأبيض من أكسيد الألمنيوم النقي أو من  $Al_2O_3$  (97÷99.5 %) والباقي  $Cr_2O_3$  أو  $Fe_2O_3$  أو  $SiO_2$  أو  $MgO$ . وتحضر أداة القطع إما بالكبس على البارد وتلبيد أو بالكبس على الساخن. أما السيراميك المعدني على أساس  $Al_2O_3$  مع إضافة 20÷40 %  $TiC$  (الأسود) فيحضر بالكبس الستاتيكي على الساخن. أيضاً ينتج في الصناعة بطريقة الكبس على الساخن السيراميك الأكسيدي الكريبيدي على أساس  $Al_2O_3$  مع إضافة  $Mo_2C$  (20÷40 %) أو  $Mo_2C-WC$  الذي يبدي متانة عالية (  $\sigma_B=450-700 Pa$  وقساوة 92-94 HRA وكثافة  $4.2-4.6 g/cm^3$  ). وتبدي أداة القطع، المثبت عليها ميكانيكياً صفيحة غير قابلة للجلخ من هذا النوع من السيراميك، خواص استثمارية عالية تسمح بزيادة الإنتاجية وترفع جودة تشغيل المشغولات وتخفض تكلفة العملية نتيجة الزيادة في سرعة القطع ثلاث مرات وبخمس الوقت زيادة عمر أداة القطع خمس مرات مقارنة مع الخلائط الأخرى المستخدمة في التشغيل الانهائي للمشغولات.

ينسب إلى مجموعة السيراميك المعدني مادة عديدة جديدة التي أساس تركيبها من نتريد السيليكون - السيلينيت (silent) ( $Si_3N_4$ ) وتحتوي على أكسيد منغنسيوم أو أكسيد الألمنيوم بكميات قليلة مع كربيد التيتانيوم أو نتريد التيتانيوم. يمتلك السيلينيت قساوة (93 HRA) ومتانة على الانحناء (700 MPa).

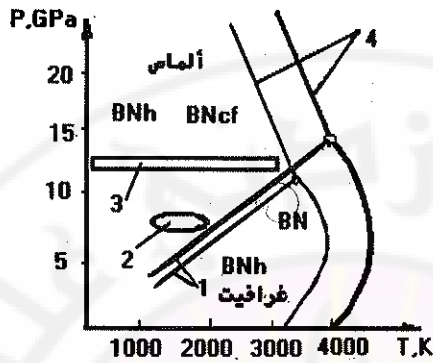
إن التطور التقني في معدات الضغط العالي أدى إلى ظهور مجموعة جديدة من المواد السيراميكية العددية وهي مواد عالية القساوة. وينسب إلى هذه المجموعة الألماس الصناعي و نتريد البورون (ذو الهيكل الشبكي المكعب نوع أسفالريت أو ذو الهيكل الشبكي السداسي نوع فيورستيت ) عند تأثير ضغط



عالي ودرجة حرارة مرتفعة إما في ظروف إستاتيكية مع استخدام محفزات أو في ظروف ديناميكية مع استخدام تفجير. وبوجود مخطط التوازن (P-T) المبين في الشكل رقم 1-11 يمكن أن نحصل على الألماس و (BN) فقط عند درجات حرارة مرتفعة وضغط عالي في حالة استقرار نسبي في الظروف العادية حيث أن سرعة التحول العكسي في التغير المستقر بطيئة جداً. يستخدم عند تخليق الألماس كمحفز خلائط معدنية من عائلة الحديد (على سبيل المثال (Ni-Mn, Ni-Cr) ولنتريد البورون يستخدم المنغنسيوم. تنحصر آلية تأثير المحفزات في إمكانية تشكيل اتحاد بيني مع الكربون والبورون والأزوت وكذلك في إعادة بناء الهيكل البلوري من صفائحي (غرافيت) إلى مكعبي (ألماس) ويحدث بشدة أكبر عند عملية إعادة التبلور (انحلالية الألماس في المعادن الحديدية أقل منها من انحلالية الغرافيت). يتبلور نتريد البورون الإسفالريتي من مصهور يوتكتيكي ( $MgB_2$  % 16 ÷ 18 و  $Mg_3N_2$  % 34 ÷ 36 و BNr % 46 ÷ 50) ، وتحدد درجة حرارة الانصهار درجة تبلور نتريد البورون المكعبي. أما إذا حل في الخليط اليوتكتيكي ( $MgB_6$ ) مكان ( $MgB_2$ ) وبسبب درجة حرارة الانصهار العالية لهذا اليوتكتيك والدونة العالية تنشأ ظروف لتبلور بلورات كبيرة من ( $BN_{cf}$ ) وذو خواص حك عالية.

يتبلور في ظروف التخليق الستاتيكي النوع إسفالريتي من الكربون أو نتريد البورون بينما في طريقة التخليق بالتفجير وبسبب الارتفاع المفاجئ للضغط (لنتريد البورون حتى 18GPa وللغرافيت حتى 30GPa) يتكون من الأشكال الغرافيتية ذات الأنواع البينية الكربون (لونسديليت) و نتريد البورون (هكسانيت). ويجري تكون هذه الأنواع حسب الآلية المارتنسية. ويمكن الحصول على الهكسانيت بخرج (90%) بتفجير نتريد البورون الغرافيتي الشكل الجاف أو الرطب، أما الماس المخلوط مع لونسديليت فنحصل عليه من الغرافيت

فقط عند وجود مبردات مثل الحديد والنحاس في الخليط العامل. ويكون المزج بالنسبة للطور الغرافيتي في هذه الحالة في حدود (30÷50%).



الشكل رقم 11-1

مخطط الحالة الطورية للكربون ونتريد البورون

1\_ توازن الغرافيت - الماس و (BN<sub>h</sub>-BN<sub>cf</sub>).

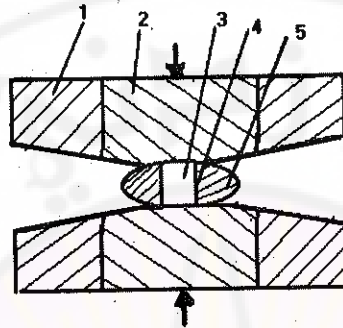
2\_ منطقة التخليق المحفز

3\_ منطقة الضغط الحدي للتحويلات

4\_ منحنيات الانصهار.

يستخدم للحصول على الضغط الستاتيكي اللازم والضروري لتخليق الألماس وأنواع نتريد البورون أساليب الطرق والكتل الساندة. ينحصر مبدأ الطرق في زيادة ضغط الكبس على حساب تركيز قوى الكبس على أكبر مساحة للسنبك. وتصنع السنايك والمصدات من خلائط قاسية من ماركة (WC) وتكبس وهي ساخنة في كتل حلقية ساندة. وتكون السنايك عندها تحت إجهادات ضغط قطرية. توضع في تجويف المسند ما يسمى العدسية المصنوعة من حجر

طباعي أو بروفليت (Profillit). تحتوي العدسية في داخلها على العينة المراد معالجتها وتكون إما الغرافيت أو نتريد البورون (الشكل رقم 2-11) .



الشكل رقم 2-11  
مخطط حجرة الضغط العالي  
1- مسند فولاذي  
2- مسند من خلائط قاسية  
3- العينة  
4- جلبة غرافيتية  
5- عدسة من البروفليت

يؤدي تشوه العدسية إلى إحداث ظروف كبس شبه ستاتيكية. ويتم التوصل إلى درجة الحرارة المطلوبة للتخليق عن طريق مرور تيار كهربائي في العينة، ومع حدوث تفاعل التخليق تنخفض شدة التيار حيث أن الألماس

المتشكل هو عازل كهربائياً . وعند وصول شدة التيار إلى قيمة معينة لا تتغير مع الزمن تنتهي عملية التخليق . تتألف العينة الحاصلة نتيجة هذه الطريقة من مساحيق الماسية ذات أبعاد وجزئيات تتراوح بين (1-800µm) وجزئيات الغرافيت والمحفز غير المنسكبة. تطحن هذه العينات ويفصل الألماس عن شوائب الركاز، ويصنف الألماس حسب الأبعاد والشكل والمتانة والحببيات المتعدنة. يستخدم من أجل الطحن الطرق التقليدية (المطاحن الكروية، الكسارات الدوارة وغيرها) والنبضية التي تعتمد على تفتيت المادة باستعمال الضغط الهيدروستاتيكي. أما تصنيف مساحيق الألماس أو نتريد البورون حسب الأبعاد فيتم بمساعدة الفارزات الهوائية الشبكية ذات التأثير المستمر وأيضاً باستعمال الفرز بالطرد المركزي للمساحيق شديدة النعومة. وبمقارنة الطرق العادية للفرز المستخدمة في مجال مساحيق المعادن نجد أن طريقة فرز وتصنيف مساحيق المواد عالية القساوة أكثر دقة وضبطاً. يستعمل للحصول على العدد من المواد عالية القساوة، التلبيد ذو الطور السائل و تحت ضغط أو التلبيد ذو التفريغ الكهربائي أو الكسب على الساخن تحت ضغط عالي. وبما أن الألماس و نتريد البورون هي مواد إسهامية التكافؤ ويجب أن تكثف عند درجة حرارة أكبر من ( $0.8T_m$ )، فإنه لا يمكن استبعاد الارتفاع الملحوظ لدرجة حرارة الغرفة المستخدمة لهذا الضغط وللتكثيف الشديد عند التلبيد. يتم الحصول على حد قاطع من مواد عالية القساوة تامة التبلور عن طريق الكبس على الساخن في حجرات الضغط العالي (الشكل رقم 11-2) عند درجات حرارة (K 1500÷3000) وضغط (5÷12 GPa).

### 11-3 المواد السيراميكية ذات الاستخدام الإنشائي:

تحتسب متانة الانهيار الهش للمواد حسب نظرية غريفيثس وفق المعادلة

التالية:

$$\sigma = K_{IC} / \sqrt{\pi c}$$

حيث  $(K_{IC})$  - لزوجة الانهيار.  $c$  - قيمة العيوب في المادة.

ومن أجل تخفيض هشاشة المادة (أي رفع المتانة) من الضروري إما

زيادة  $(K_{IC})$  أو تقليل  $c$ . غير أن  $(K_{IC} = \sqrt{2E \gamma})$  (معامل يونغ،  $\gamma$  -

طاقة الانهيار) وبالتالي يمكن زيادة  $(K_{IC})$  برفع معامل يونغ عن طريق

الحصول على مادة ملبدة ذات بناء بلوري ناعم وكثافة قريبة للنظرية، أو زيادة

$(\gamma)$  عن طريق التحكم بالبناء البلوري وظروف التلبيد وزيادة تجانس البناء

البلوري.

ترتبط زيادة  $c$  في معظم الحالات مع تشكل الشقوق تحت تأثير

المسامات التي تنشأ نتيجة استخدام ملدنات عند التشكيل وكذلك نتيجة ظاهرة

الانكماش عند التجفيف والتلدين. لذلك ولتقليل الهشاشة والحصول على

سيراميك إنشائي ذو وثوقية عالية من الضروري إبعاد حتى القليل من المسامية.

### 11-4 المواد عالية الخزفية (الغلينازومات):

تسمى المواد التي يكون أساسها أكسيد الألمنيوم بالمواد عالية الخزفية،

وتجد هذه المواد استعمالاً صناعياً واسعاً وخاصة في الصناعات الكهربائية

والإلكترونية لتحضير أجسام أجهزة أنصاف النواقل والعوازل عالية الفولتية.

وبفضل المرونة العالية للمواد يمكن تشكيل عناصر كبيرة نسبياً وذلك عن طريق

تخليق من خلال فوهات وسكب في قوالب جبسية والسكب والكبس الساخن.

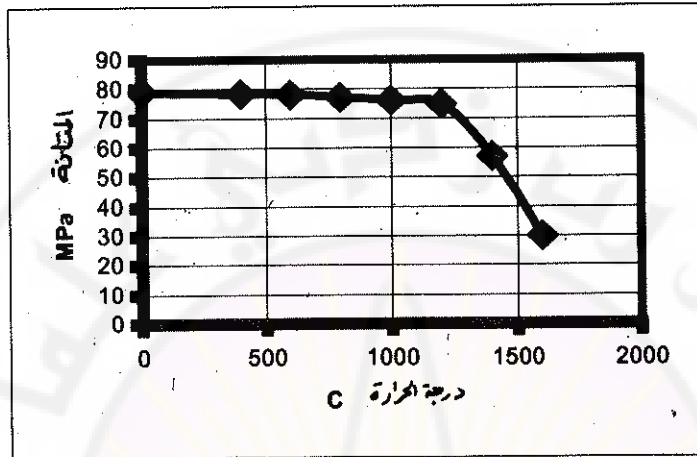
وَيَدْخُلُ فِي تَرْكِيبِ هَذِهِ الْمَوَادِّ بِالإِضَافَةِ لِأَكْسِيدِ الأَلُمِينِيُومِ  $SiO_2$ ,  $Ba$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ . تُعْتَمَدُ خَوَاصُّ السِّيرَامِيكِ عَلَى التَّرْكِيبِ الكِيمِيَاءِيِّ لِلْمَرْكَبِ وَتُخْتَلَفُ هَذِهِ الْخَوَاصُّ بِاخْتِلَافِ نِسْبَةِ أَكْسِيدِ الأَلُمِينِيُومِ وَبَيِّنَ الْجَدُولَ رَقْمَ 11-1 تَغْيِيرَ خَوَاصِّ الْمَرْكَبِ وَفَقِ تَغْيِيرَ نِسْبَةِ أَكْسِيدِ الأَلُمِينِيُومِ.

الجدول رقم 11-1: تغيير خواص المادة وفق تغيير نسبة أكسيد الألمنيوم

| نسبة $Al_2O_3$                | % 80          | % 85          | % 92          | % 95          |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| الكثافة $kg/m^3$              | -3200<br>3400 | -3200<br>3400 | -3850<br>3900 | -3600<br>3700 |
| درجة حرارة التليد $^{\circ}C$ | -1350<br>1400 | -1350<br>1400 | -1610<br>1700 | -1600<br>1700 |
| المتانة على الانحناء<br>MPa   | 280-270       | 300-280       | -450<br>530   | 380-300       |

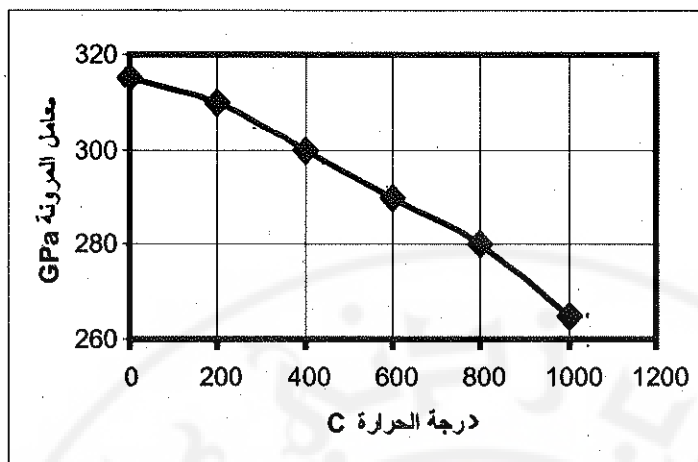
كما يعتمد أيضا الثبات الحراري للسيراميك على المؤشرات الفيزيائية والميكانيكية، وتكون المتانة على الانحناء  $1/2 - 1/3$  من متانة الضغط أما المتانة على الشد فتكون  $1/5 - 1/15$  من متانة الضغط. تنخفض متانة المركب على الضغط والانحناء والشد بارتفاع المسامية ودرجة الحرارة، حيث يبين الشكل رقم 11-3 علاقة متانة الشد لـ  $Al_2O_3$  بدرجة الحرارة. يلاحظ مع زيادة درجة الحرارة حتى الدرجة  $1200^{\circ}C$  انخفاض طفيف في المتانة وبارتفاع درجة الحرارة فوق  $1200^{\circ}C$  تبدأ المتانة بالانخفاض الشديد. وكذلك يتغير معامل المرونة بتغير درجة الحرارة ( الشكل رقم 11-4 )، فمع زيادة درجة

الحرارة ينخفض معامل المرونة ولكن بشكل قليل حتى درجة الحرارة  $800^{\circ}\text{C}$  وبعدها تزداد شدة الانخفاض.



الشكل 3-11

علاقة متانة الشد لـ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  بدرجة الحرارة



الشكل 4-11

علاقة معامل المرونة لـ  $Al_2O_3$  بدرجة الحرارة

تستخدم أنواع مختلفة من السيراميك كمواد إنشائية ولكن الجديد منها والذي له آفاق مستقبلية في الاستخدام من أجل تصميم القطع التصميمية هي مجموعة المواد ذات التراكيب التي لا تحتوي الأوكسجين (مثل  $Si_3N_4, AlN$ ) والسيالونات (الأطوار ذات التراكيب المقعد نظام  $Si-Al-O-N$ ).

**نتريد الألومنيوم  $AlN$ :**

هو الارتباط الأحادي للأزوت مع الألمنيوم ونحصل على القطع من التبريد وفق لثلاث طرق أساسية:

1. تبليد القطع المضغوطة تحت ضغط (30 MPa) في وسط من الأزوت عند درجة حرارة حتى  $2000^\circ C$ .



2. التآيد التفاعلي للقطع المشكلة من خليط (AlN) ومسحوق الألومنيوم في الأزوت أو غاز النشادر ولكن لا تسمح هذه الطريقة بتحضير قطع متينة.

3. الكبس على الساخن لمسحوق (AlN) المحضر بالطرق المعروفة. وبهذه الطريقة يمكن الحصول على سيراميك ذو كثافة نسبية (99.5%) عند درجة حرارة ( $1700^{\circ}\text{C}$ ) وضغط تشكيل ( $20\text{ MPa}$ ) وزمن إبقاء (20 - 15) دقيقة.

يبين الجدول رقم 11-2 تأثير طريق التحضير على الخواص الأساسية للسيراميك من (AlN).

تؤدي الكثافة العالية للسيراميك من نتريد الألومنيوم إلى إمكانية استخدامه بكفاءة في وسط خامل حتى درجة حرارة ( $1800^{\circ}\text{C}$ )، وفي الفراغ (الفاكوم) حتى درجة حرارة ( $1600^{\circ}\text{C}$ ) وبالهواء حتى ( $1300 - 1400^{\circ}\text{C}$ ). وتعطي الناقلية الحرارية العالية التي تعتبر ميزة لهذه المادة والثبات الحراري استخدام مستقبلي لهذا السيراميك في ظروف عمل ذات تغيرات حرارية مفاجئة.

الجدول رقم 11-2: الخواص الأساسية للسيراميك من نتريد الألومنيوم

| طريقة التحضير |            | الخواص                                  |
|---------------|------------|-----------------------------------------|
| كبس للساخن    | تلييد عادي |                                         |
| 3.2           | 3.2-3.24   | الكثافة g/cm <sup>3</sup>               |
| 97            | 97-98      | الكثافة النسبية %                       |
| 270           | 20 - 25    | المتانة على الانحناء MPa:               |
| 190           | -          | عند درجة الحرارة 20 °C                  |
| 127           | -          | 1000°C                                  |
|               |            | 1400 °C                                 |
| 5.64          | 4.8-4.9    | معامل التمدد الطولي 10 <sup>6</sup> /°C |
| 66            | 1 - 3      | الناقلية الحرارية w/m.K (عند 25 °C)     |

#### نتريد السيليكون (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) :

نحصل على (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) بالنتردة المباشرة، على ذلك يمكن الحصول على (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) باسترجاع أكسيد السيليكون بالكربون في وسط من الأزوت في مجال درجات الحرارة (1250 ÷ 1300 °C). عند نتردة السيليكون المعدني لا تتغير عملياً أبعاده، وبالرغم من أن الحجم النوعي لنتريد السيليكون المتكون أكبر من الحجم النوعي للسيليكون نفسه. يحدث في هذه العملية تلييد تفاعلي ويتشكل (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>). ونتيجة ملئ مسامات (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) التشكل تنخفض بشدة مسامية القطعة وعندها تمتلك القطعة مسامية نسبية تقترب إلى النظرية. وتصنع القطع من نتريد السيليكون أيضاً عن طريق التلييد تقريباً عند درجات الحرارة (1600 °C) للقطع المكبوسة على البارد أو المشكلة بالطريقة العجينية من

مساحيق نتريد السيليكون. ويستخدم هنا  $(Y_2O_3)$ ،  $(Al_2O_3)$ ،  $(MgO)$  كموامل مساعدة لتنشيط عملية التلييد، وهذه الأكاسيد تتفاعل مع  $(Si_3N_4)$   $(SiO_2)$  وتشكل الشوائب وعند درجات حرارة عالية يشكلون طور سائل. ونتيجة لذلك تستند عملية التلييد وتؤمن كثافة مرتفعة للقطع الملبدة. وبما أنها تقترب درجة حرارة تلييد  $(Si_3N_4)$  إلى درجة حرارة تفككه، ينفصل بسهولة السيليكون، لذلك ولرفع جودة القطعة من الضروري التحكم الدقيق بدرجة حرارة التلييد والوسط المحيط. ويتم أيضاً الحصول على قطع كثيفة من  $(Si_3N_4)$  بواسطة الكبس على الساخن. ويستخدم مواد مضافة منشطة عند الكبس على الساخن كما هو عند التلييد والضغط. ولكن بغض النظر عن الكميات القليلة للمواد المدخلة فإنه يسمح الكبس على الساخن بالحصول على قطع ذات كثافة قريبة من الكثافة النظرية للمادة. وفي الآونة الأخيرة تم الحصول على النتريد الثنائي للسيليكون ذو كثافة  $(3.2-3.21g/cm^3)$ . وأبعاد جزيئات أقل من واحد ميكرون وذلك عن طريق الترسيب والطور الغازي. يبين الجدول رقم 11-3 بعض خواص السيراميك من  $(Si_3N_4)$  المصنوع بطرق مختلفة.

يعطي استخدام السيراميك من نتريد السيليكون في المحركات التوربينية الغازية إمكانية الزيادة الكبيرة في معامل الأداء ويخفض استهلاك الوقود ويقلل من وزن المحرك. ويزال عادة الارتفاع الطبيعي لدرجة الحرارة على مداخل التوربينات عن طريق النظام الأمثل للتبريد واستخدام مواد متينة حرارياً. ولكن عملياً تم حل الزيادة الكامنة في درجة الحرارة العاملة لخلائط النيكل المتينة حرارياً والمستخدمة في التوربينات الغازية. ولهذا إذا استخدمنا كمود متينة حرارياً مواد سيراميكية غير مبردة، فيمكن رفع درجة الحرارة العاملة تقريباً بمقدار  $(250 - 300^{\circ}C)$  حتى  $(1379^{\circ}C)$ .

الجدول 11-3: خواص السيراميك من نتريد السيليكون

| طريقة التحضير |            |                  | الخواص                                    |
|---------------|------------|------------------|-------------------------------------------|
| تلييد تفاعلي  | تلييد عادي | الكبس على الساخن |                                           |
| 2.6           | 3.2        | 3.2              | الكثافة g/cm <sup>3</sup>                 |
| 19            | 0          | 0                | الكثافة النسبية %                         |
| 0.2-0.25      | 1.0-0.5    | 1.0-1.6          | المتانة MPa                               |
| 170           | 310        | 320              | معامل المرونة GPa                         |
| 9             | 15         | 18               | القساوة MPa                               |
| 4.7           | 17.4       | 55.8             | الناقلية الحرارية w/m.K                   |
| 2.8           | 3.2        | 3.2              | معامل التمدد الحراري 10 <sup>-6</sup> /°C |

#### السيالونات (Si-Al-O-N):

ظهرت السيالونات في السبعينات وهو تصنيف جديد من المواد السيراميكية، توجّهت اهتمامات الباحثين في نظام (Si-Al-O-N) إلى الطور (-)  $\beta$  (Sialon) وهو عبارة عن محلول صلب على أساس  $(\beta - \text{Si}_3\text{N}_4)$ ، ويتشكل المحلول الصلب نتيجة تشعب أيونات  $(\text{Al}^{3+})$   $(\text{O}^{2-})$  في النسق البلوري لـ  $(\beta - \text{Si}_3\text{N}_4)$ . ويتم الحصول على  $(\beta - \text{Sialon})$  بالكبس على الساخن لخليط دقيق التشتت من  $(\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3)$  عند درجة حرارة  $(1600-1900^\circ\text{C})$  وضغط  $(100 - 300 \text{ MPa})$ . وتحتوي هذه المادة على  $(95\% \beta - \text{Sialon})$  ومعدوم المسامية. وكما بينت النتائج التجريبية يمكن الحصول أيضاً على  $(\beta - \text{Sialon})$  بطريقة التلييد عند درجات حرارة حتى  $(1800^\circ\text{C})$  في جو من

الآزوت لمكبوسات من خليط مساحيق دقيقة التشتت من ( $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{AlN} + \text{SiO}_2$ ) أو ( $\text{SiO}_2 + \text{AlN}$ ). يملك السيلون الملبد متانة على الانحناء مساوية ( 485 MPa) عند درجات حرارة ( $20 - 1000^\circ\text{C}$ ) و ( $275 \text{ MPa}$ ) وعند درجة حرارة ( $1370^\circ\text{C}$ )، ومعامل يونغ  $297 \text{ GPa}$ ، ومعامل التمدد الحراري  $3.2 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$  ومعامل الناقلية الحرارية ( $22 \text{ w/m.K}$ )، وهناك أيضاً إمكانية التخليق منخفض درجة الحرارة مساحيق نظام ( $\text{AlN} + \text{Si} + \text{SiO}_2$ ) عند درجات حرارة ( $1400 - 1500^\circ\text{C}$ ) غير أن التخليق والتلبيد أيضاً معاً إلى الآن لم يعطي حلولاً مقبولة. يتسم في الوقت الحاضر ( $\beta\text{-Sialon}$ ) بالخواص التالية: الكثافة ( $3 \div 3.1 \text{ g/cm}^3$ )، القساوة ( $13-15 \text{ GPa}$ )، المتانة على الانحناء ( $400 \div 450 \text{ MPa}$ )، معامل يونغ ( $200 \div 280 \text{ GPa}$ )، معامل التمدد الطولي (في درجات حرارة  $20-1200^\circ\text{C}$ )  $(2.4 \div 3.2) \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ . وكما يتصف بالمقاومة العالية للتأكسد.

يعتبر صنف السيلون من السيراميك الذي له مستقبلاً كمواد إنشائية والذي يتصف بالخواص الإيجابية التالية: متانة حرارية عالية ومقاومة للتأكسد ومعامل تمدد طولي منخفض وتكنولوجيا جيدة ومقاومة للتبخر وناقلية حرارية معتدلة.



## الفصل الثاني عشر

### الحل الأمثل في اختيار المواد لتصنيع الأجزاء الهندسية

- 1.12 اختيار المواد المعدنية من أجل المقاومة
- 2.12 اختيار المواد المعدنية من أجل مقاومة الحرارة
- 3.12 ما هي المعادن التي يجب أن نستعملها؟
- 4.12 اختيار المواد المعدنية بهدف مقاومة التعب
- 5.12 اختيار المواد المعدنية بهدف المتانة





## الحل الأمثل في اختيار المواد لتصنيع الأجزاء الهندسية

### 12-1 اختيار المواد المعدنية من أجل المقاومة

(selecting metallic materials for strength):

تعتبر المقاومة الكافية للمواد من المتطلبات الرئيسية لأي مادة هندسية تستخدم في التطبيقات الإنشائية. وفي غالب الأحيان يتم أخذ خواص المقاومة بعين الاعتبار حين اختيار المادة وذلك من أجل التطبيقات والاستخدامات المختلفة من حيث مقاومة الشد ومقاومة الخضوع. وبسبب كون النسبة بين هاتين المقاومتين  $\sigma_t/\sigma_{y.s}$  هي ثابتة من أجل أي صنف من المعادن فإنه غالباً ما يذكر في الموصفات واحدة منها فقط. كما تعتبر استطالة الشد مؤشراً جيداً للمطيلية وتعتبر مؤشراً مهماً في قابلية التشكيل .

إن المادة ذات مقاومة الخضوع البالغة 1035 MPa يمكن اعتبارها ذات مقاومة عالية في أي مادة هندسية مستخدمة تجارياً في هذا السياق . إن المقاومة ذات القيمة 517 MPa من الممكن أن تكون منخفضة بالنسبة للفولاذ المعالج حرارياً، وتعتبر عالية من أجل خلانط الألمنيوم. لذلك فإن المقاومة من الممكن أن ينظر إليها كمقياس للتعقيد الميتالورجي أو درجة تطور الخليطة. إن التعقيد الميتالورجي يعني أن الخليطة هي صعبة التشكيل والتشغيل واللحام ومكلفة نسبياً، وهذه الخلانط المعقدة لا يتم اختيارها إلا إذا كانت المقاومة العالية هي المطلوبة فقط من أجل التطبيقات والاستخدامات العملية.

## 1-1-12 المقاومة المنخفضة (low strength):

إن المقاومة بالنسبة لأكثر المعادن النقية هي قليلة وتعتمد بشكل كبير على النقاوة. فعلى سبيل المثال فإن الألمنيوم النقي (99.999%) يملك مقاومة خضوع على الشد بقيمة 12 MPa ذلك فإن الألمنيوم النقي ذو نقاوة (99%) يملك مقاومة خضوع على الشد بقيمة 39 MPa .

إن أسباب استئصال معادن ذات مقاومة منخفضة هي :

- انخفاض الكلفة.
- قابليتها للمعالجة.
- الحاجة لمواجهة متطلبات الاستخدامات العملية.
- المقاومة.

إن الخواص مثل: قابلية التشكيل، مقاومة الحث والتآكل الكيميائي، وزن الإنهاء من الممكن أن تكون ذات خواص أكثر أهمية بالنسبة للتطبيقات المستخدمة في هذه الحالات عن استخدامات المقاومة العالية.

## 2-1-12 المقاومة المتوسطة (Medium strength):

يجب أن يتم خلط معظم المعادن لإنجاز وتحقيق مستويات المقاومة المتوسطة. إن خلائط الألمنيوم القابلة للمعالجة الحرارية ذات المسلسل 2000,7000 تقع في منتصف المجال للمقاومة المتوسطة. كما تمتلك الخلائط ذات السلسلة 7000 (Al-Mg-Cu-Zn) مقاومة ذات قيمة أعلى من كافة خلائط الألمنيوم. وتعطي الخلائط ذات الأساس النحاسي مجالاً واسعاً من المقاومات المنخفضة والمتوسطة. وهناك أنواع واسعة من الفولاذ تمتلك مقاومة خضوع بقيمة 207 MPa حتى 690 MPa وتختلف المقاومة وتتغير حسب محتوى الخليطة وحسب المعالجة الحرارية. فعند النهاية المنخفضة في هذا المجال بالنسبة للمقاومة يكون الفولاذ متوسط الكربون بينما يقع الفولاذ المقوى والممتن

بواسطة المعالجة الحرارية عند النهاية العليا أو المرتفعة لهذا المجال بالإضافة إلى طرق أخرى مثل: التبريد باستخدام التحكم، التشكيل على البارد، الخلط أو الاشابة بالنسب القليلة جدا من العناصر الخلائطية .

يستخدم الفولاذ غير القابل للصدأ (stainless steels) الأوستينيتي أو الفريتسي من أجل الاستخدامات التي تتطلب مقاومة متوسطة متحدة مع مقاومة حث كيميائي أو مقاومة أكسدة. إن الأصناف الأوستينيتية تعتبر غير قابلة للمعالجة الحرارية حيث تمتلك مقاومة خضوع تقارب  $207 \text{ MPa}$  مع ذلك فإن المقاومة من الممكن أن تزداد حتى  $655 \text{ MPa}$  تقريباً بواسطة التشكيل على البارد.

### 3-1-12 المقاومة العالية (High strength) :

بالنسبة للخلائط غير الحديدية فإن النحاس المقسى بالترسيب فقط والمحتوي على 2% بيريليوم بالإضافة إلى معظم خلائط التيتانيوم تستطيع تحقيق مقاومة أكبر من  $795 \text{ MPa}$  . تحقق خلائط التيتانيوم مزايا على الفولاذ عالي المقاومة ويعود ذلك بشكل رئيسي إلى كون كثافتها منخفضة بحوالي 60% عن الفولاذ. يتواجد عند النهاية المنخفضة لمجال المقاومة العالية الكثير من الفولاذ متوسط الكربون والفولاذ ذو النسبة الخلائطية المنخفضة بعد إجراء المعالجة الحرارية بواسطة دورة التقسية الأولى. عندما تكون نسبة الكربون حوالي 0.40% فإنها تمنح الفولاذ مقاومة عالية ولكنها تؤدي إلى مشاكل مترافقة بقابلية للحام ضعيفة ومتانة منخفضة، لذلك فمن أجل قابلية جيدة للحام فإن محتوى الكربون يجب أن ينخفض عن 0.30% بشكل جيد. وكحل بديل عن زيادة محتوى الكربون في الفولاذ فغالبا ما يتم خلطه لتجنب الهشاشة وكذلك تجنب قابلية اللحام الضعيفة، وتتضمن العناصر الخلائطية الشائعة كل من: النيكل Ni، الكروم Cr، الموليبدوم Mn، والفاناديوم V. يمكن للفولاذ الخلائطي

الحاوي على نسبة تقل عن % 0.10 كربون لتحقيق مقاومة خضوع حتى MPa 1000 مع متانة ممتازة أي مقاومة جيدة جداً للصدمات وقابلية جيدة للحام .

#### 12-1-4 المقاومة فوق العالية (Ultrahigh strength) :

تعتبر أكثر أنواع الفولاذ المستعملة ذات المقاومة العالية جداً هي فولاذ (V-Cr-Mo) ويحتوي على نسبة  $1.6\% \text{Si}$  . ويستعمل بشكل أساسي لقوالب التشكيل على الساخن فولاذ (V-Cr-Mo-5) وذلك لتحقيق مقاومات مشابهة. إن المحتوى العالي للخليطة يجعلها مكلفة جداً من أجل الاستعمال المنتشر على نطاق واسع .

إن المساوي الرئيسية لهذه الأنواع من الفولاذ هي : قابلية التشغيل الضعيفة بعد المعالجة الحرارية، ويمكن معالجة خلائط الحديد- نيكل الحاوية على  $18-25\% \text{Ni}$  حرارياً بعد التشغيل النهائي وهذا النوع من الفولاذ أيضاً يمكنه تحقيق مقاومات عالية تصل حتى MPa 3500 . وعلى الرغم من النسبة العالية لمحتوى النيكل (Ni) في هذا النوع من الفولاذ الذي يجعله مكلفاً بشكل أولي إلا أنه من الممكن أن يكون أقل كلفة بشكل عام بسبب الكلفة الأقل لعملية التشغيل . كما أنه من الممكن لحام هذا النوع بدون معالجة حرارية لاحقة .

#### 12-1-5 المواد المركبة ذات البنية الأساسية المعدنية:

تمنح تقوية وتمتين المعادن المصبوبة بواسطة الألياف لزيادة وتحسين المقاومة ولكن بوجود بعض النقص في المطيلية. إن المركبات ذات البنية الأساسية المعدنية (Cs MM) قد تم صنعها بواسطة اتحادات واندماجات كثيرة ومتعددة من مادة البنية الأساسي وألياف التقوية من أجل تطوير الخواص المطلوبة لكل واحد من التطبيقات المستخدمة .

## 12-2 اختيار المواد المعدنية من أجل مقاومة الحرارة ( selecting materials for metallic temperature resistance ) :

يمكن أن تعمل المعادن والخلائط عند درجات حرارة تتراوح فيما بين درجات الصقيع أي شديدة البرودة وحتى أعلى من الدرجة، كما أن بعض المواد السيراميكية الهندسية من الممكن استخدامها حتى درجة حرارة  $1650^{\circ}\text{C}$ . إن خواص الشد لأكثر المعادن الهندسية عند درجة حرارة الغرفة تكون مستقلة عن الزمن، ومع ذلك فإن المقاومة عند درجات الحرارة المرتفعة تعتمد على: معدل الانفعال وزمن التعرض للحرارة.

سوف يؤدي تعريض المعدن للحمل الثابت عند درجة حرارة مرتفعة إلى حصول الزحف، وهذا الزمن متوقف على زيادة في الطول ويمكن تحت شروط معينة أن يؤدي إلى الانهيار والانكسار. وتعتبر درجة الحرارة والزمن هي المتغيرات التي تصف عملية الزحف. يكون معدل الزحف بشكل عام أعلى كما يكون الزمن أقصر حتى حصول الانهيار وذلك بزيادة درجة الحرارة والحمل. تتراوح مدة الاختبارات لعينات الشد ضمن المجال من عدة شهور إلى أكثر من عشر سنوات .

يلعب اتزان البنية المجهرية الدور الأساسي في تحديد سلوك الزمن وعمر الخدمة (service life). وتزداد حركية الذرات عند درجات الحرارة المرتفعة وكذلك تزداد حركية الانخلاعات وقابليتها للانتقال. كذلك يزداد تركيز الاتزان للشواغر أو الفراغات مع الحرارة ويمكن أن تحدث حركة للتشوه أو التشكل الجديد وتغير أنظمة الانزلاق أو تصبح أنظمة انزلاق إضافية فعالة. لهذا فإن هناك خلائط قليلة تكون مستقرة من أجل فترة طويلة من الزمن.

تعتبر مقاومة درجة الحرارة للمعادن لها علاقة تقريباً بنقطة الانصهار (Tm). فعلى سبيل المثال عند درجات الحرارة المرتفعة يكون الألمنيوم Al

أقوى من الزنك Zn . كما إن النحاس يكون أقوى من الألمنيوم وعلى الرغم من أن المعادن ذات نقطة الانصهار العالية يجب أن تمتلك أفضل مقاومة زحف فإنه يوجد عوامل أخرى من الممكن أن تتحدد استعمالها عند درجات الحرارة المرتفعة. على سبيل المثال فإن المعادن الصامدة للحرارة مثل النيوبيديوم Nb, الموليبدنيوم Mo, التنغستين W, حيث تتمتع بارتفاع نقطة الانصهار فلا يمكن تصنيعها بسهولة بمقاطع معقدة وكبيرة وتحوي مقاومة أكسدة منخفضة. يملك التيتانيوم Ti مقاومة زحف ضعيفة نسبة لنقطة انصهاره , مع ذلك فإن خلائط التيتانيوم تستعمل في تطبيقات الفضاء بسبب النسبة العالية بين الوزن والمقاومة. ولا يستعمل الكروم بسبب المطيلية المنخفضة ولكنه عنصر خلانطي مهم في خلائط كثيرة مقاومة للزحف. إن معادن الحديد والكوبالت Co والنيكل Ni هي المسؤولة عن الخلائط المقاومة للزحف بشكل أفضل وهي تملك نقاط انصهار منخفضة نسبياً. إن درجة حرارة التأثير أو العمل للمادة المعدنية تكون محددة بواسطة معدل تغير البنية الدقيقة الداخلية .

### 12-3 ما هي المعادن التي يجب أن نستعملها:

أ- تحت درجة الحرارة ( $150^{\circ}\text{C}$ ):

إن الرصاص هو المادة المعدنية الهندسية فقط التي لا يمكن استعمالها فوق درجة حرارة الغرفة. وحتى في درجة حرارة الغرفة فإنها ستخضع لزحف يمكن إدراكه تماماً. يمكن استعمال نحاس المحامل المتين ( $11400^{\circ}\text{C}$ ) عند درجة حرارة حتى ( $200^{\circ}\text{C}$ ).

ب- من درجة حرارة  $150^{\circ}\text{C}$  وحتى  $400^{\circ}\text{C}$ :

إن خلائط المغنيزيوم متضمنة Re, Mg العناصر الأرضية النادرة مثل Zr-Th-Mg, Zr-Zn-RE-Mg و خلائط Mg-Al-Zn قد استعملت حتى

درجة حرارة  $315^{\circ}\text{C}$  . تؤمن الخلائط التي تحوي الثوريوم مقاومة أعلى للزحف بينما خلائط (Mg-Al-Zn) تملك مقاومة أقل، تؤمن خلائط الألمنيوم زيادة في درجة الحرارة المستعملة فوق تلك المستعملة لخلائط المغنزيوم. تستعمل أصناف الحديد الصلب ذات النسبة العالية من الخلائطية في غلاف توربين الضغط المنخفض تحت درجة حرارة ( $250^{\circ}\text{C}$ ). ويستعمل فوق تلك الدرجة من الحرارة الفولاذ الكربوني. وتكون حدود درجة الحرارة العليا للفولاذ الكربوني أو الفولاذ الكربوني المبنغيزي هي حوالي ( $425^{\circ}\text{C}$ ) .

ج- من درجة  $400^{\circ}\text{C}$  وحتى  $600^{\circ}\text{C}$  :

يستعمل الفولاذ منخفض الخلائطية وفوق درجة حرارة  $400^{\circ}\text{C}$  فإن الخليط أو السبائك مع الموليبدنيوم يزيد من مقاومة الزحف. ويستعمل فولاذ Mo-Cr وفولاذ Cr - Mo-V حتى درجة حرارة حوالي  $500^{\circ}\text{C}$ . ومن أجل الخدمة الطويلة جداً ( $2 \times 10 \text{ hr}$ ) فإن الفولاذ المنخفض الخلائطية يملك حدوداً منخفضة لدرجات حرارة الاستعمال. ويستعمل عالمياً فولاذ ( $0.2\text{C}-1\text{Cr}$ )  $1\text{Mo}-0.25\text{V}$  في التوربينات الدوارة ذات الضغط العالي والمتوسط. أما فولاذ ( $2.25\text{Cr}-1\text{Mo}$ ) فيستعمل بدرجات الحرارة العالية لأنابيب البخار وفي التطبيقات التي تتطلب مقاومة عالية لدوانية الهيدروجين الأكالة حتى درجة حرارة حوالي ( $560^{\circ}\text{C}$ ). إن الفولاذ ذو نسب الخليط المنخفضة معرض لقشور التأكسد فوق هذه الدرجة من الحرارة. أما خلائط التيتانيوم فهي غير مستخدمة إلى ما فوق ( $600^{\circ}\text{C}$ ) لأنها تكون عرضة للهشاشة وللأكسدة على السطح .

د- من درجة حرارة  $600^{\circ}\text{C}$  وحتى درجة حرارة  $650^{\circ}\text{C}$  :

إن كلتا المقاومتين أي مقاومة الأكسدة ومقاومة الزحف هي عوامل مهمة في هذا المجال من درجة الحرارة. ويضاف الكروم للحديد لزيادة مقاومة التقشر. إن الفولاذ الفريتي غير القابل للصدأ هو أقل كلفة عن الأصناف

الأوستينيتية. وتكون الميزة الرئيسية للفولاذ غير القابل للفرط غير القابل للصدأ هي مقاومة الأكسدة بالمقارنة مع الفولاذ الأوستينيتي .  
هـ- من درجة حرارة  $650^{\circ}\text{C}$  وحتى  $1000^{\circ}\text{C}$  :

يعتبر الفولاذ الأوستينيتي غير القابل للصدأ مع معادن الحديد-نيكل والنيكل وللكوبالت هي أساساً للخلائط الفائقة وهذه الخلائط تستعمل في مجالات درجات الحرارة المذكورة. إن الحدود العليا لاستخدام الفولاذ الأوستينيتي غير القابل للصدأ هي عند درجة حرارة ( $750^{\circ}\text{C}$ ) ويملك النوع 316 خواص مقاومة إجهاد التمزق بقيمة أعلى بكثير من أي سلسلة الخليطة AISI-300 . وتعتبر خلائط (Cr-Ni-Mn) هي أقوى أيضاً من معظم خلائط سلسلة 0300 . وتحتوي الخلائط الفائقة Fe-Ni نسبياً على كميات كبيرة من الحديد وتزداد مقاومتها بواسطة ترسبات المركبات المعدنية البينية أو الكربيد في البنية الأساسية ذات الهيكل الشبكي على شكل مكعب متمركز وجهياً (F.C.C.) .  
و- من درجة حرارة  $1000^{\circ}\text{C}$  فما فوق :

إن المعادن الصامدة للحرارة هي: التتغستين (W) والتانتاليوم (Ta) ونيوبيديوم (Nb) والموليبيديوم (Mo) وخلائطها ومن الممكن أن تستعمل حتى درجة الحرارة  $1500^{\circ}\text{C}$ . وتتضمن الاستعمالات النموذجية للمعادن الصامدة للحرارة فوهات الصاروخ، والحجب الساترة للإشعاع، ومكونات الأنابيب الإلكترونية، وأسلاك مصابيح الإضاءة .

#### 12-4 اختيار المواد المعدنية بهدف مقاومة التعب ( الإعياء ) ( selecting metallic materials for fatigue resistance ) :

إن التصدع بالتعب يفسر ويعلل حوالي 80% من الانهيارات والاختفاقات في المكونات الهندسية. ويعتبر التعب هو صيغة خطيرة في التصدع



الذي يحدث في المواد عندما تخضع لأحمال دورية وهي تحدث بواسطة تطور وتقدم نمو التشققات. بغض النظر عن المادة المستخدمة فإن إمكانية الانهيار بالتعب من الممكن أن تنخفض عبر تصميم حذر وممارسة تصنيع بعناية واهتمام. إن التصدع التعب في المعادن هو الأكثر شيوعاً. يوجد عند اجهادات ذات قيمة عظمى وقيمتها أقل من مقاومة الشد للمادة عمليتين بارزتين عند حدوث التعب: بداية التشقق والانتشار أو الانتقال. وتكون الصفة المميزة لتصميم خليطة من المعادن هي مقاومة التعب وتتضمن :

1. يعزز تواجد الخلائط من الانزلاق العرضي والتواءة وخواص التقسية بالعمل، حيث تزيد مقاومة بذور التشقق .
2. زيادة مقاومة الشد عبر الاشابة أو الخلط أو المعالجة الحرارية .
3. خفض سماكة مقطع القطعة المشغولة إلى الحد الأصغري .
4. تنعيم وصقل السطوح بدلاً من أن تكون خشنة التشغيل، وخفض انقطاعات السطح حتى الحد الأصغري مثل الثلم والأخاديد والثقوب والاستنادات الزاوية وأسنان اللوالب ومجرى الخوابير وفرض أو أخاديد اللسين.
5. استعمال مستوى إجهادات منخفضة نسبة إلى مقاومة التعب للمادة المرادة في شروط الأحمال المترددة .
6. حجم حبيبات أصغر في التطبيقات المعرضة للتعب ذو دورة عالية حيث أن عمر التعب مستقل نسبياً عن حجم الحبيبات في حالة التطبيقات للتعب ذو الدورة المنخفضة .
7. عدم تواجد الانقطاعات الميتالورجية مثل المسامات أو النفاذية أو المكثفات والشوائب الدخيلة و أو انفصالات الخلائط لتخفيض مواقع بذور التشقق إلى الحد الأدنى .

8. تواجد الاجهادات المتبقية على السطوح بواسطة عمليات مثل : السك ودرفلة السطوح والضرب بالكريات. وذلك لتعزيز مقاومة بداية التشقق للسطح بواسطة التعب.

9. شروط الوسط المحيط بالقطعة وكذلك التصميم للجزء وذلك لتقليل الشروط المفضية إلى التعب الحراري والتعب بالتآكل الكيميائي .

10. تجنب الطلي المعدني، مثل Ni, Cr أو التلبس بالكاديوم حيث يمكنها من تخفيض عمر التعب وذلك يعود لوجود التشققات الصغيرة الميكروية في الطلاء. إن المرحلة (I) للصمود والتحمل من الممكن جعلها أقرب إلى الكمال والمثالية بواسطة تصميم لا يوجد فيه موالدات إجهاد قدر الإمكان. من الممكن أن يتباطأ انتقال التشقق بواسطة الحفاظ على الاجهادات منخفضة أو على مفهوم الأمان لعمر القطعة مبني على مفاهيم ميكانيك التصدع.

## 5-12 اختيار المواد المعدنية بهدف المتانة ( selecting metallic materials for toughness ) :

هي خاصية محددة حيث يكون المكون قادراً على امتصاص كمية معينة ودقيقة من الطاقة الميكانيكية بدون تصدع، إن الطاقة الممتصة خلال كلا حالتين التشوه والتصدع هي عبارة عن قياس المتانة .

متانة التثليم والتحزيز (Notch toughness) : تتأثر هذه المتانة بواسطة:

1. التركيب الكيميائي .
2. البنية المجهرية .
3. حجم الحبيبات .
4. نمط انسياب الحبيبات .
5. طريقة التصنيع .

6. شروط السطح (مثل الكربنة أو نزع الكربنة).

يجب تجنب الانهيار الهش الكارثي حيث يجب أن تكون درجة حرارة العمل للمكونات الإنشائية أعلى من درجة حرارة انتقال المادة من الحالة المطيلية إلى الحالة الهشة.

#### متانة التصدع (Fracture toughness):

إن مفهوم متانة التصدع لا يعمل بشكل جيد مع الفولاذ ذو المقاومة العالية والمعادن غير الحديدية وذلك بسبب الانتقال التدريجي من السلوك المطيل إلى السلوك الهش. يستخدم هذا المفهوم لتقييم متانة المعادن في مستوى الانفعال أو تقييم  $K_{IC}$  لحساب حجم التشقق الحرج في المكونات المجهدة والتي من الممكن أن تؤدي إلى انهيار حاد ومفاجئ. تستخدم البيانات عن حجم التشقق الحرج ونمو التشقق تحت الحرج في الحالتين: تصميم المكونات وتحليل الانهيار أو التصدع.



## المصادر العلمية

1. أبو جهجاه جميل. المعادن ( خواصها-اختباراتها-معالجاتها الحرارية )، منشورات جامعة دمشق. 1981-468 صفحة.
2. أبو جهجاه جميل وزملاؤه. علم المواد ( خواصها واختباراتها)، منشورات جامعة دمشق. 1991-376 صفحة.
3. الدهشان محمد وزملاؤه. الهندسة التطبيقية للمواد، منشورات جامعة الملك سعود. 1997-381 صفحة.
4. الدهشان محمد. الفلزات الخفيفة وسبائكها، منشورات جامعة الملك سعود. 1997-532 صفحة.
5. الدهشان محمد. الفلزات غير الحديدية وسبائكها، منشورات جامعة الملك سعود. 1997-754 صفحة.
6. الدهشان محمد. الحديد والفولاذ ( المعالجات الحرارية والسطحية )، منشورات جامعة الملك سعود. 1999-381 صفحة.
7. لاخيتين يوري. علم المعادن والمعالجة الحرارية للمعادن، موسكو: دار مير. 1983-446 صفحة.
8. ماليشيف أ.ي. تكنولوجيا المعادن، موسكو: دار مير. 1981 - 552 صفحة.
9. Б.Н. Арзамасов и др. Материаловедение, М.:Машиностроение: 1989.-384с.
10. Конструкционные материалы: справочник/ Арзамасов Б.Н. и др. - М.:Машиностроение: 1990.-688с.

11. Н.В. Новиков и др. Сопротивление разрушению сверхтвёрдых композиционных материалов.- К.: Наукова думка; 1993.-221с.
12. А.П. Эпик, К.К. Палёха. Новые порошковые и композиционные материалы.- К.: УМК ВО, 1989.-116с.
13. Ю.Л. Пилиповский, и др. Композиционные материалы в машиностроении.- К.: Тэхника . 1990.-141с.
14. А.М. Самохоцкий, М.Н. Кунявский. Лабораторные работы по металловедению. М.: Машиностроение. 1971.-184с.
15. В.Ф. Лабунец. Авиационные конструкционные материалы с высокой удельной прочностью.- К.: КМУГА. 1995.-116с.
16. Haasen Peter. Physical metallurgy.: Cambridge University press. 1996.-420p.
17. J.C. Anderson. Materials science. Chapman and Hall.1998.-589p.
18. W.D. Callister. Materials science and engineering, an introduction. John Wiley & Sons, Inc. 2003.-650p.
19. C. Newey, G. Weaver. Materials principles and practice. Butter Worth Heinemann Ltd. 1990.-405p.
20. D.L. Chung. Carbon fiber composites. Butter Worth Heinemann Ltd. 1994.-215p.
21. Smithells light metals handbook, E.A. Brandes, G.B. Brook. Butter Worth Heinemann Ltd. 1998.-194p.
22. Smithells metals reference book. E.A. Brandes, G.B. Brook. Butter Worth Heinemann Ltd. 1999.-950p.
23. D. Hull, T.W. Clyne. An Introduction to composite materials. Cambridge University Press. 1996.-326p.

## جدول المصطلحات العلمية

### A

|                            |                                 |
|----------------------------|---------------------------------|
| Absorption                 | امتصاص                          |
| Allotropic transformations | التحولات الطورية ( الألتروبية ) |
| Alloy                      | خليطة                           |
| Alloy steels               | الفولاذ الشبائكي                |
| Annealing                  | تليدين                          |
| Austenite                  | أوستنيت                         |

### B

|                       |                                |
|-----------------------|--------------------------------|
| Bainite               | بينيت                          |
| Body centered lattice | الهيكل البلوري المتمركز وسطياً |
| Bronze                | البرنز                         |
| Brittleness           | هشاشة                          |

### C

|                    |                  |
|--------------------|------------------|
| Carbon steel       | الفولاذ الكربوني |
| Cast iron          | حديد صب          |
| Cathode            | مهبط             |
| Cementite          | سمنتيت           |
| Characteristic ray | الأشعة المميزة   |
| Constrution        | اختناق           |
| Copper             | النحاس           |
| Corrosion          | التآكل           |
| Creep              | الزحف            |

Creep strengthe

مقاومة الزحف

Crystal lattice

الهيكل الشبكي للبلورة

Curie point

نقطة كوري

## D

Degree of freedom

درجة الحرية

Dendritic structure

البنية الشجرية

Diamagnetism

ديامغناطيسي

Diffusion

الانتشار

Dislocation

انخلاع

Ductility

الليونة

Dynamic tests

الاختبارات الديناميكية

## E

Elasticity

المرونة

Elastic deformation

التشوه المرن

Elastic limit

حد المرونة

Endurance limit

حد الصمود

Equilibrium diagrams

مخططات التوازن

Erosion

التآكل بالحك

Etching

التخريش

Eutectic point

النقطة اليوتكتيكية

Eutectoid point

النقطة اليوتكتونيدية

Extrapolation

التقريب الخارجي

## F

Face centred lattice

الهيكل الشبكي المتمركز وجهياً



|                  |                     |
|------------------|---------------------|
| Fatigue          | التعب               |
| Fatigue strength | مقاومة التعب        |
| Fatigue limit    | حد التعب            |
| Ferrite          | الفريت              |
| Ferromagnetic    | فرومغناطيسية        |
| Fracture         | كسر ، تحطم          |
| Free energy      | القدرة الحرة        |
| <b>G</b>         |                     |
| Gibbs phase rule | قاعدة الطور لجيبس   |
| Gray cast iron   | الحديد الصب الرمادي |
| Grain boundaries | حدود الحبيبات       |
| Grain growth     | نمو الحبيبات        |
| Grain size       | حجم الحبيبات        |
| <b>H</b>         |                     |
| Hardenability    | قابلية التقسية      |
| Hardening        | التقسية             |
| Hardness         | القساوة             |
| Heat treatment   | المعالجة الحرارية   |
| Homogeneous      | متجانس              |
| Heterogeneous    | غير متجانس          |
| Hysteresis loop  | منحنى الهسترة       |
| Hypereutectic    | بعد يوتكتيكي        |
| Hypereutectoid   | بعد اليوتكتويدي     |

|                           |                     |
|---------------------------|---------------------|
| Hypoeutectic              | قبل اليوتكتيكي      |
| Hypoeutectoid             | قبل اليوتكتوئيدي    |
| <b>I</b>                  |                     |
| Impact                    | الصدم               |
| Induction                 | التحريض             |
| Intercrystalline          | بين البلورات        |
| Interference              | تداخل               |
| Interstitial solutions    | المحاليل التداخلية  |
| Isothermal transformation | التحول الايزوترمي   |
| <b>L</b>                  |                     |
| Ledeburite                | الليديبوريت         |
| <b>M</b>                  |                     |
| Malleable cast iron       | الحديد الصب الطري   |
| Martensite                | المارتنسيت          |
| Metastable                | موازن توازناً حرجاً |
| Miller indices            | إشارات ميللر        |
| Monochromatic             | وحيد اللون          |
| <b>N</b>                  |                     |
| Neutral                   | معتدل               |
| Nitriding                 | النترجة             |
| Nodular cast iron         | الحديد الصب الكروي  |
| Normalization             | التنسيق             |
| Notch                     | حز ، ثلم            |
| Nucleus                   | نواة                |

## P

|                        |                  |
|------------------------|------------------|
| Paramagnetic           | بارامغناطيسية    |
| Parameters             | متغيرات          |
| Pearlite               | البرليت          |
| Peritectic             | البريتكتيكي      |
| Phases                 | أطوار            |
| Phases transformations | التحولات الطورية |
| Polishing              | تلميع            |
| Plasticity             | اللدونة          |
| Plastic deformation    | التشوه اللدن     |
| Proportional limit     | حد التناسب       |

## Q

|                 |                |
|-----------------|----------------|
| Quantum theory  | النظرية الكمية |
| Quantum numbers | الأرقام الكمية |
| Quenching       | تقسية          |

## R

|                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| Recrystallisation  | إعادة التبلور        |
| Reversible         | ظاهرة قابلة للانعكاس |
| Retained austenite | الأوستنيت المتبقي    |
| Roentgen rays      | الأشعة السينية       |
| Rupture            | تحطم، انقطاع         |

## S

|             |                  |
|-------------|------------------|
| Segregation | الانفصال الصلب   |
| Slip planes | مستويات الانزلاق |

|                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| Softness                  | الطراوة                   |
| Solidification            | التصلب                    |
| Solid solution            | المحاليل الصلبة           |
| Spectrum                  | طيف                       |
| Stable                    | متوازن، مستقر             |
| Stainless steel           | فولاذ غير قابل للصدأ      |
| Steadite                  | السيديت                   |
| Strain hardening          | التقسية بالتشكيل          |
| Strength                  | مقاومة                    |
| Stress                    | اجهاد                     |
| Substitution              | تبادلي                    |
| Super cooling             | التبريد الزائد            |
| Surface hardening         | التقسية السطحية           |
| <b>T</b>                  |                           |
| Tempering                 | الإرجاع                   |
| Tempering brittleness     | هشاشة الإرجاع             |
| Thermal fatigue           | التعب الحراري             |
| Toughness                 | المتانة                   |
| Transformation            | تحول، تغير                |
| Troostite                 | التروستيت                 |
| <b>U</b>                  |                           |
| Ultimate tensile strength | الحد الأعظمي لمقاومة الشد |
| Ultrasonic                | الأمواج فوق الصوتية       |
| <b>W</b>                  |                           |

White cast iron

الحديد الصب الأبيض

Wohler test

اختبار فولر

Y

Yield point

حد الانسياب

Young's modulus

عامل يونغ



**اللجنة العلمية:**

١. الأستاذ الدكتور جميل أبو جهجاه

٢. الأستاذ الدكتور فؤاد عازر

٣. الأستاذ الدكتور محمد سلامة

**المدقق اللغوي:**

الأستاذ الدكتور علي أبو زيد

**حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات**