

# **الباب الثاني**

## **المعادن الحديدية**

### **Ferrous Metals**



# الفصل الأول

## المعادن الحديدية

### الحديد النقي:

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

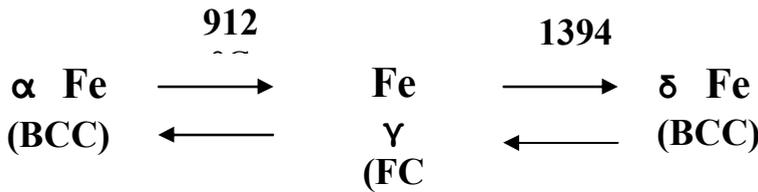
الرمز الكيميائي للحديد هو (Fe) وهو لا يصدأ في الهواء الجاف ولكنه يصدأ بسرعة في الهواء الرطب المحتوي على ثاني أكسيد الكربون مكوناً أكسيد الحديد المائي  $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  المعروف بصدأ الحديد.

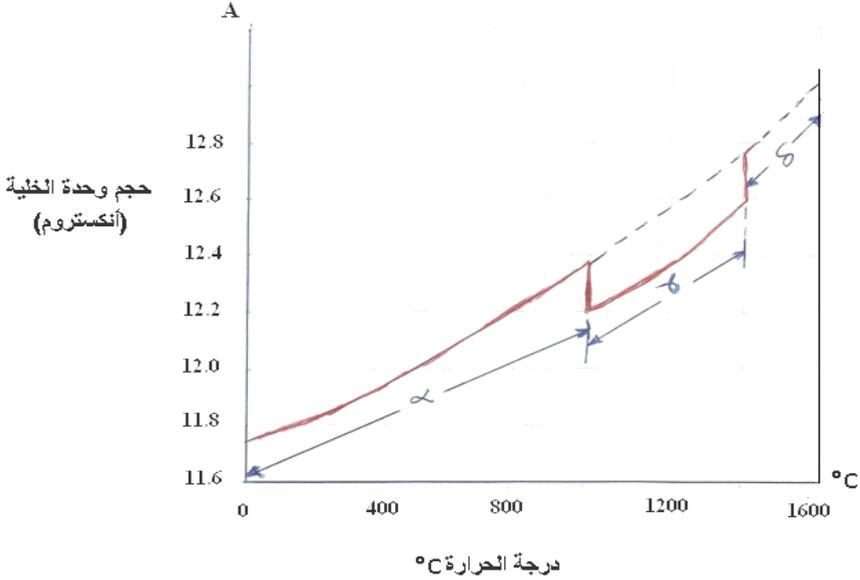
### الحديد وخاصية التأصل: Allotropic

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

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

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





الشكل 5.1: تأثير التحولات الأتروبية على تمدد الحديد النقي

### الحديد الصناعي:

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

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

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

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

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

### أطوار الحديد والكربون:

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

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

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

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

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

#### الأيوكتيك: Eutectic

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

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

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

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

#### الأيوكتويد: Eutectoid

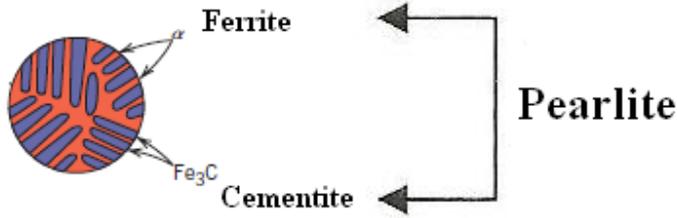
وهو عبارة عن مزيج ميكانيكي من طورين يحدث في نظام الحديد والكربون عندما تكون نسبة الكربون  $0.76\%$  تقريباً عند درجة الحرارة  $727^{\circ}\text{C}$  وينتج عن ذلك تحول الأوستنايت الصلب (طور واحد) إلى محلول ميكانيكي صلب يتكون من طورين فيرايت و سمنتايت.



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

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

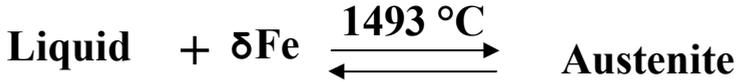
إذن يتكون الأيوكتويد من مزيج ميكانيكي متلاحم من  $89\%$  فيرايت و  $11\%$  سمنتايت (كربيد الحديد) على شكل بناء شرائحي (طبقات متتالية). ويسمى هذا الأيوكتويد الشرائحي بالبيرليت Pearlite (شبيه اللؤلؤ) لأنه يسبب انكسار الضوء ويحلله إلى ألوان الطيف المختلفة.



الشكل (2) بنية مجهرية لحبيبات البيرلايت

البروتكتويد: **Protectoid**

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



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

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

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

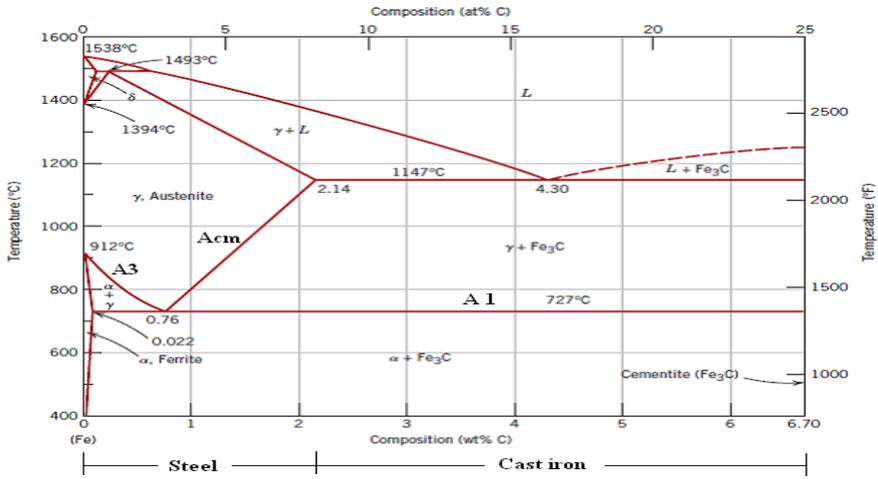
$$\text{Liquid \%} = 100 - 79 = 21\%$$

### الخطوط الحرجة في مخطط الاتزان للحديد الكربون:

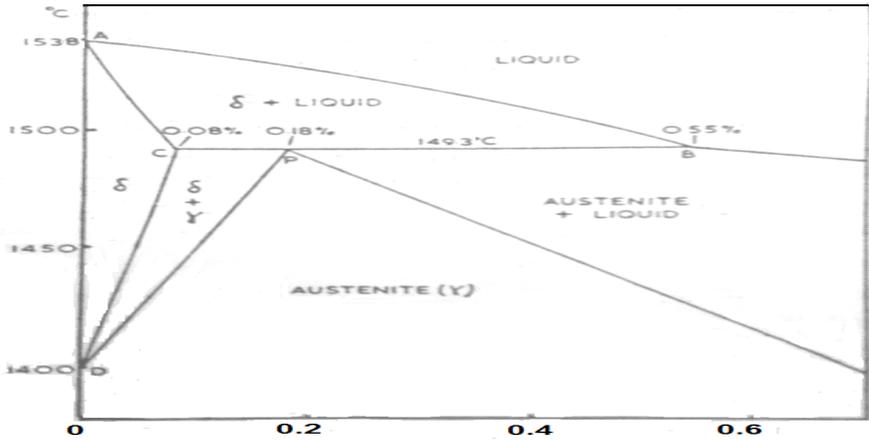
**الخط A1:** يمثل خط التحول الأيوتكتويدي وهو خط ترسب البيرلايت ويتم عند درجة حرارة ثابتة وهي  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  لكل نسب الكربون ويسمى بالخط الحرج الأدنى Lower critical line أو خط الأيوتكتويد.

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

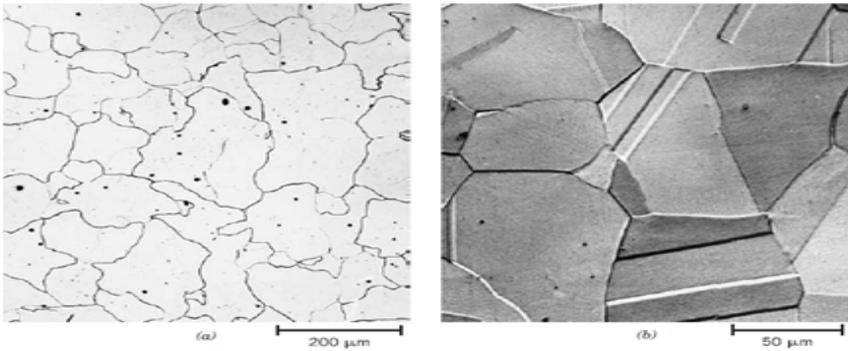
**الخط Acm:** ويمثل خط ترسب السمنتايت (كربيد الحديد) من الأوستنايت وفيه نسبة الكربون في الأوستنايت تزداد بازدياد درجة الحرارة.



الشكل (3) مخطط التوازن الحراري للحديد والكربون



الشكل (4) منطقة البروتكتويد

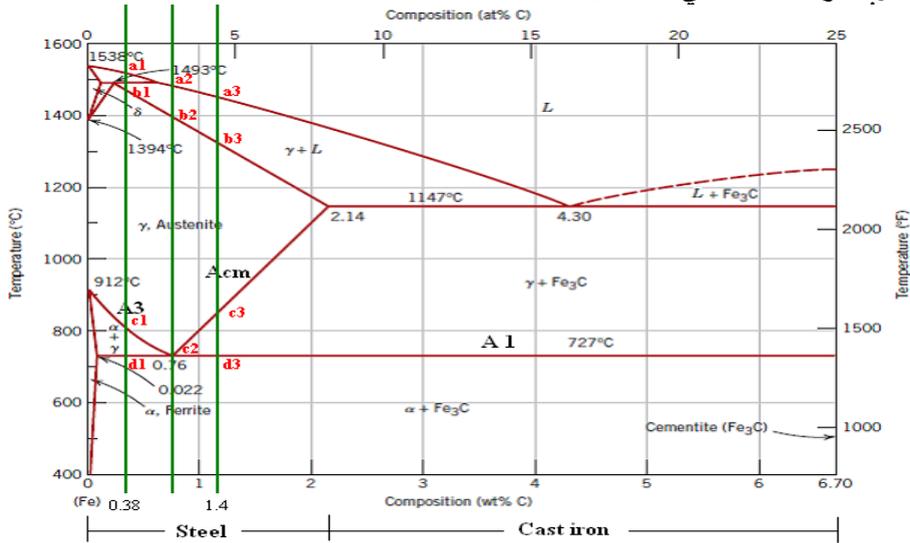


الشكل (5) صورة مجهرية للفيريت (a) والاسنتايت (b)

## الفصل الثاني الصلب الكربوني العادي Plain Carbon Steel

### مقدمة:

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



الشكل (1) مخطط التوازن الحراري للحديد والكربون

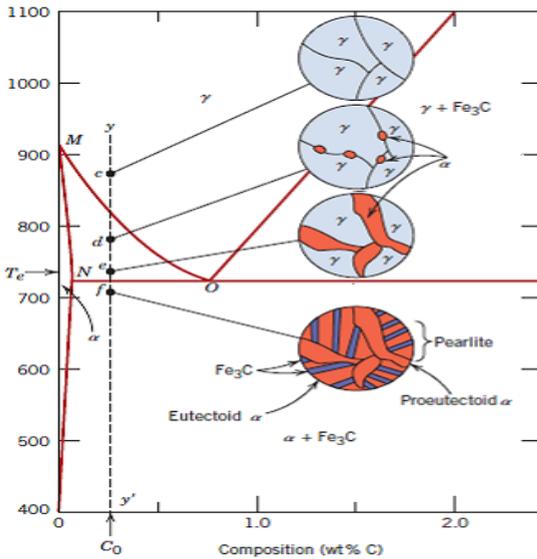
أولاً: سبيكة تحتوي على 0.38% كربون:

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

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

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

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



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

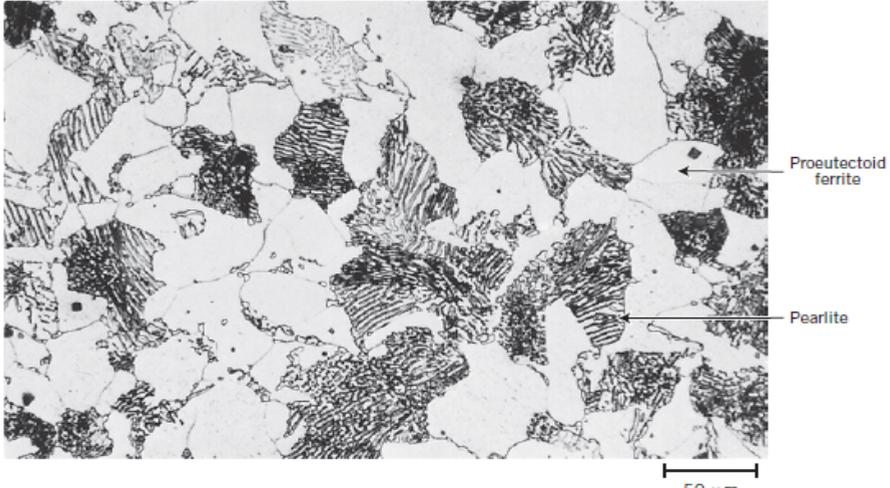


Figure 6. 2b Photomicrograph of a 0.38 wt% C steel having a microstructure consisting of pearlite and proeutectoid ferrite.

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

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

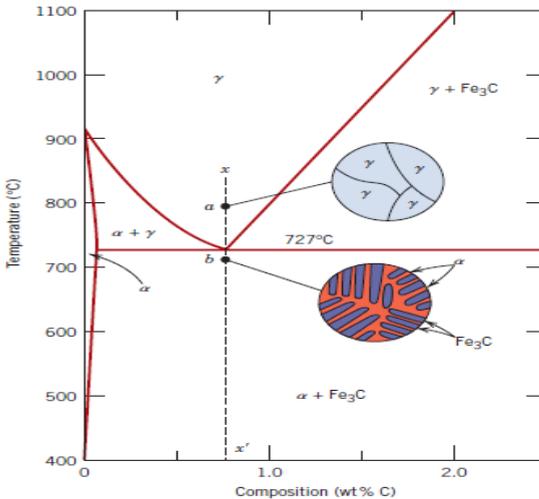
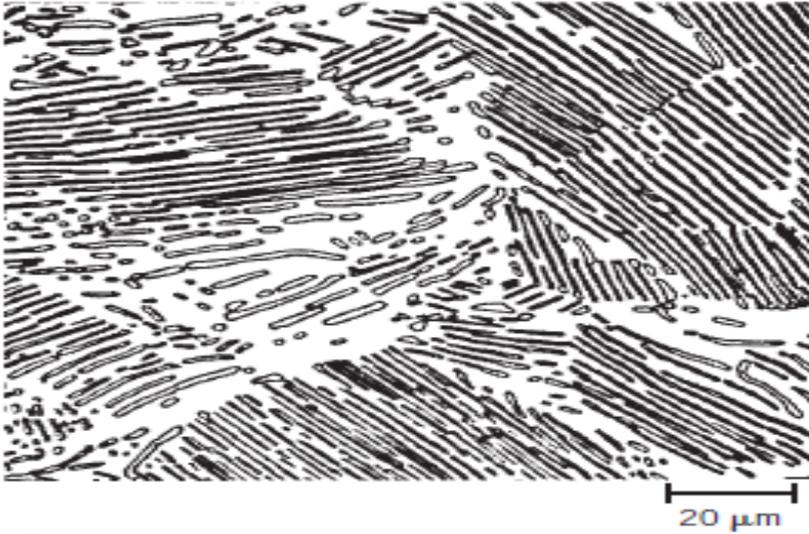


Figure 6.3a Schematic representations of the microstructures for an iron-carbon alloy of eutectoid composition (0.76 wt% C) above and below the eutectoid temperature.



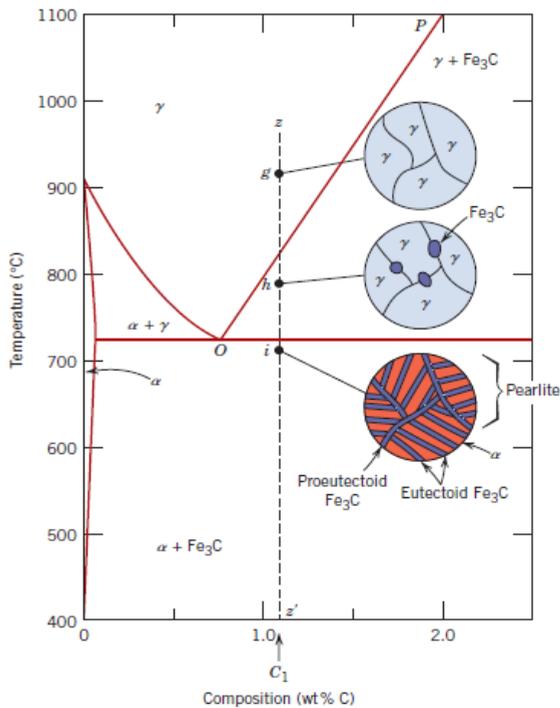
**Figure 6.3 b** Photomicrograph of a eutectoid steel showing the pearlite microstructure consisting of alternating layers of  $\alpha$ -ferrite (the light phase) and  $Fe_3C$  (thin layers most of which appear dark).

الشكل (3) مراحل التبريد المتوازن والبنية المجهرية للصلب الأيوتكتويد

ثالثاً: سبيكة تحتوي على 1.4% كربون:

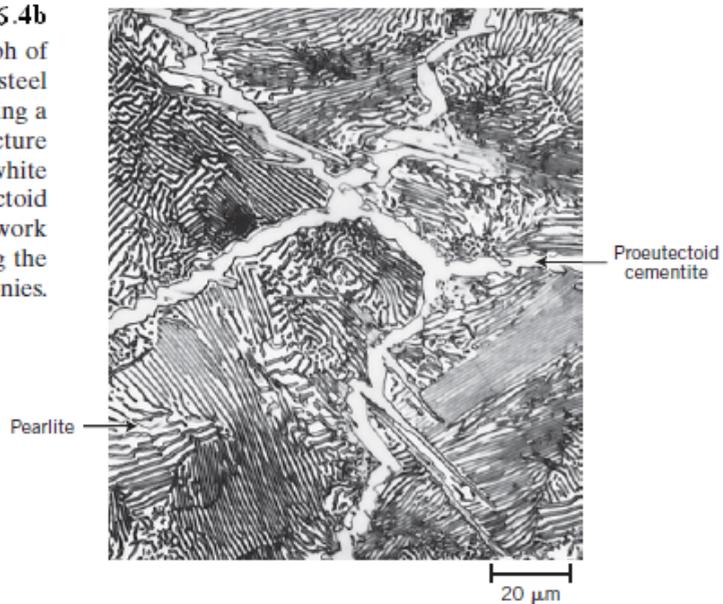
في حالة التجمد المتزن لسبيكة الصلب التي تحتوي على 1.4% كربون فإنه يبدأ في التجمد عند النقطة  $a_3$  لتتكون حبيبات من الأستنايت. وبإنخفاض درجة الحرارة يتحول المنصهر المتبقي إلى أستنايت عند  $b_3$ . ونتيجة لإنخفاض درجة الحرارة وعند النقطة  $c_3$  فإن إبر من السمنتايت تبدأ في الترسيب على حدود حبيبات الأستنايت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

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



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

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



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

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

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

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

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

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

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

### الشوائب في الصلب:

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

### المنجنيز:

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

### السيلكون:

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

### الفسفور:

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

## الكبريت:

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

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

## استخدامات الصلب الكربوني:

يمكن تصنيف الصلب الكربوني من حيث الغرض إلى الأنواع التالية:

### الصلب منخفض الكربون: Low carbon steel

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

### الصلب الطري: Mild steel

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

### الصلب متوسط الكربون: Medium carbon steel

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

## الصلب عالي الكربون: High carbon steel

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

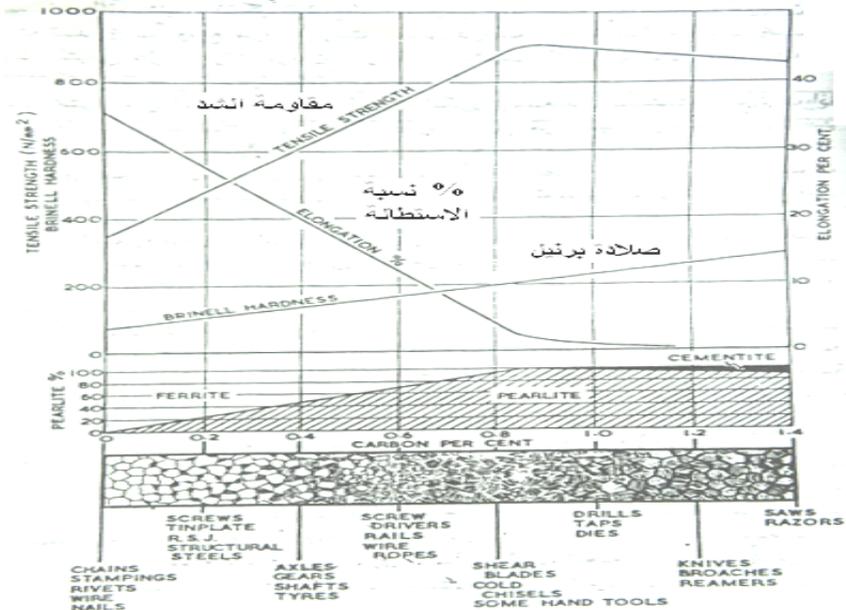
## الصلب العدد: Tool steel

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

## العلاقة بين نسبة الكربون والخواص الميكانيكية للصلب:

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

زيادة نسبة الكربون تقل اللدانة والإستطالة (المطيلية والطروقية).



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

## الفصل الثالث

### المعالجات الحرارية للفلوآذ (الصلب الكربوني)

#### الجزء الأول

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

##### مقدمة:

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

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

##### المعالجات الحرارية:

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

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

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

### التخمير: Annealing

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

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

### التخمير لإزالة الإجهادات: Stress-relief annealing

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

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

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

### تخمير التكور: Spheroidising annealing

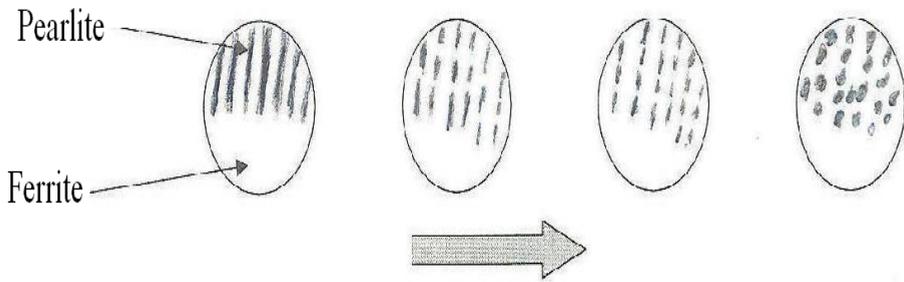
هذا النوع من التخمير يستخدم في تليين صلب العدد Tool steel وبعض أنواع الصلب السبائكي الذي يقسى في الهواء Air-Harding alloy steel وفي هذه الحالة يمكن سحب الصلب وتشغيله نسبياً بالقطع.

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

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

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

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



الشكل (1) مراحل تكور السمنتايت البيرلايتي

### تخمير المسبوكات: Annealing of casting

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

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

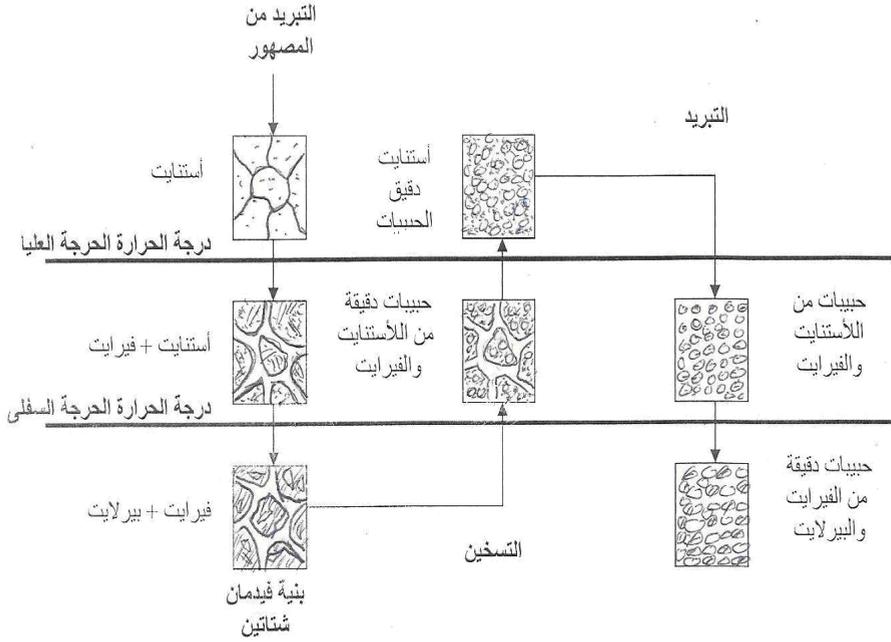
من أكثر المعالجات ملائمة للمسبوكات الكبيرة هي تسخينها ببطء حتى درجة حرارة تعلق حوالي  $40^{\circ}\text{C}$  من الدرجة الحرجة العليا (درجة حرارة التخمير تعتمد على نسبة الكربون (تناسب عكسي))، ومن ثم الإحتفاظ بها عند هذه الدرجة لفترة مناسبة تكفي فقط لتجانس الحرارة داخل المسبوك، ثم تبريده ببطء داخل الفرن.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

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

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

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

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



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

### المعادلة أو المعالجة: Normalizing

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

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

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

#### مقدمة:

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

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

#### التقسية: Hardening

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

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

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

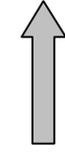
عندما تبرد سبيكة معدنية (سبيكة النحاس والقصدير مثلاً) فجائياً فإن ذلك يمنع حدوث تحولات في البنية الداخلية لذلك يصبح بالإمكان حبس البنية الداخلية كما هي عند درجة الحرارة العالية والإحتفاظ بها عند درجة حرارة الغرفة. إما في حالة سبائك الحديد والكربون فإن العكس هو الحادث حيث أنه لا يمكن الإحتفاظ بالأسنتنايت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

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

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

#### أوساط التقسية: Quenching medium

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



زيادة  
معدل  
التبريد

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

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

**التقسية وحجم المنتج:**

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

**التقسية والتركيب الكيميائي للمنتج:**

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

**التقسية وشكل المنتج:**

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

**شقوق التقسية: Cracking quench**

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

**المراجعة (تطويع الفولاذ): Tempering**

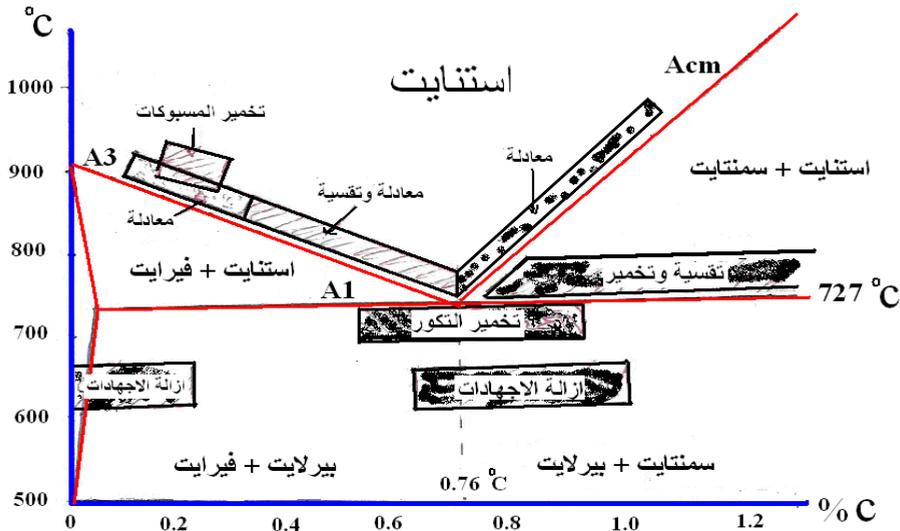
الصلب الكربوني المقسى كلياً يزيد حجمه ويكون هش (قصيفاً) وذو إجهادات داخلية عالية ولا يمكن استخدامه إلا بعد إجراء عملية المراجعة وذلك لإزالة الإجهادات الداخلية وتقليل القصافة في نفس الوقت. في عملية المراجعة يسخن

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

المراجعة عند درجات حرارة أكثر من  $400^{\circ}\text{C}$  تؤدي إلى ترسيب جزيئات السمنتايت بدرجة تجعلها مرئية تحت المجهر بتكبير بسيط ويعرف هذا النوع من البنية بالسوربايت. والفرق بين التروستايت والسوربايت فقط في حجم الحبيبات.

#### تحول المارتنسايت:

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



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

## الفصل الخامس

### المعالجات الحرارية للفلوآذ (الصلب الكربوني)

#### الجزء الثالث

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

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

يبين الشكل (2) منحنيات TTT لصلب أيوتكتويدي (0.76% كربون). وهي توضح الزمن اللازم للتحول الذي يحدث للبنية الداخلية عند تبريد الأستنايت تبريداً مفرداً  $super-cooling$  وحفظه عند أي درجة حرارة ثابتة.

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

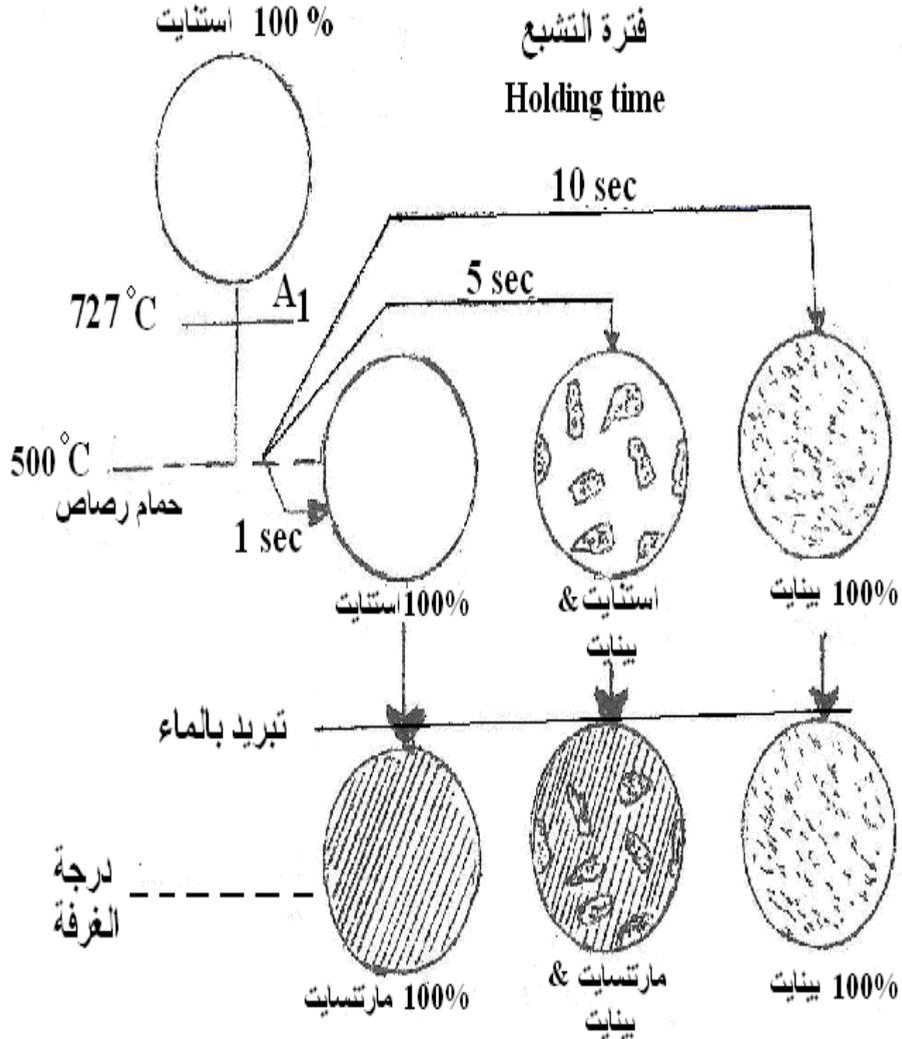
على سبيل المثال إذا تم أخذ ثلاث عينات من الصلب الأيوتكتويدي وسخنت لدرجة حرارة أعلى مباشرة من  $727^{\circ}C$  (مجال الأستنايت)، ومن ثم تم تبريد العينات الثلاث فجائياً في رصاص مصهور عند درجة حرارة ثابتة  $500^{\circ}C$  (الشكل 1). إذا تم سحب عينة من الحمام بعد ثانية من الزمن ثم بردت فجائياً في الماء فسيتم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

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

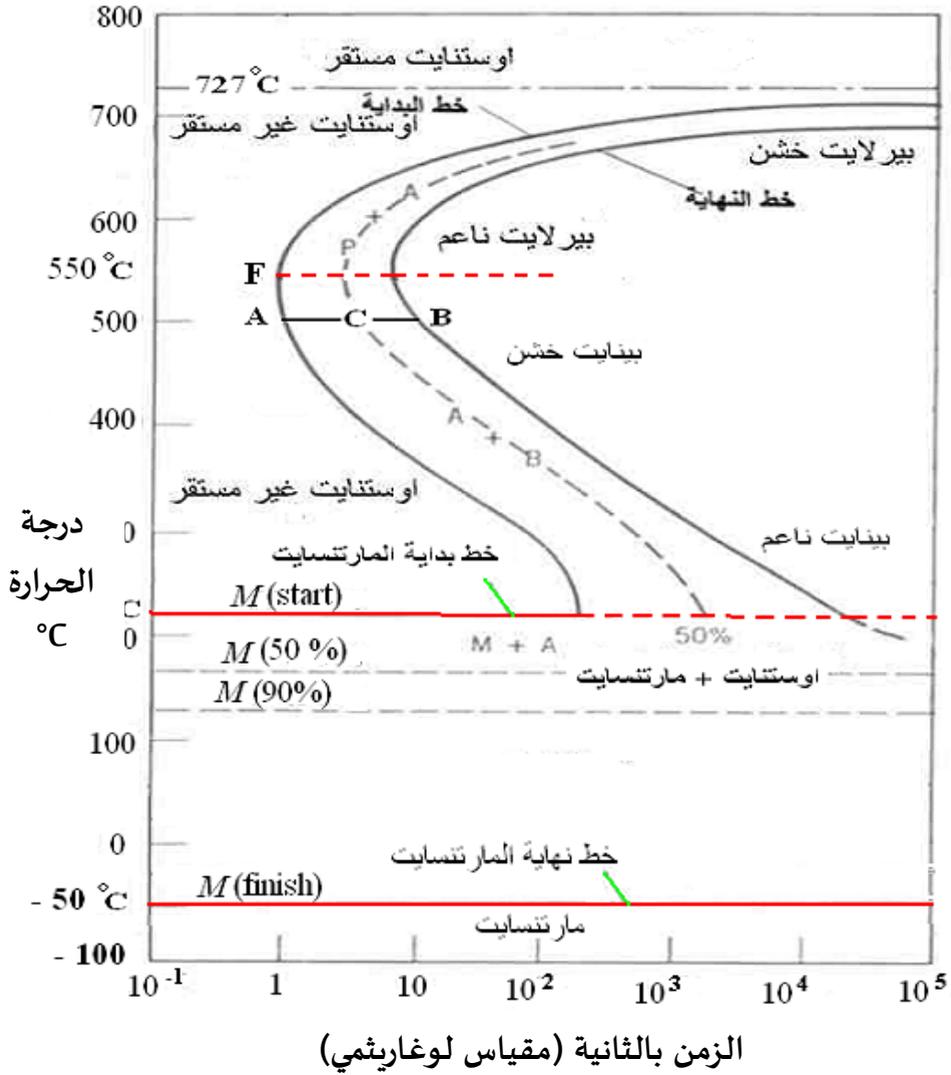
درجة حرارة الحفظ (500°C) كانت محتوية على البينايث والأستنايث نتيجة لعدم إكتمال تحول الأخير.

بتكرار مثل هذه المعالجات عند درجات حفظ مختلفة يمكن معرفة البينايث

المجهرية الناتجة ومن ثم إنشاء منحنيات ال TTT.



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



الشكل (2) منحني التحول في درجات الحرارة الثابتة (الزمن - درجة الحرارة - التحول) (TTT)

وصف منحني التحول عند درجات الحرارة الثابتة (منحني الزمن ودرجة

الحرارة والتحول TTT-curves):

كما موضح في الشكل (9.2) الخط الأفقي الممثل لدرجة الحرارة  $727^{\circ}\text{C}$  يعتبر درجة الحرارة الحرجة العليا التي تكون بنية الصلب الأوتوكتويدي أعلى منها مكونة كلية من الأستنايت المستقر وأسفل هذا الخط يعتبر الأستنايت غير مستقر.

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

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

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

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

### منحنيات التحول TTT-curves والتبريد المستمر:

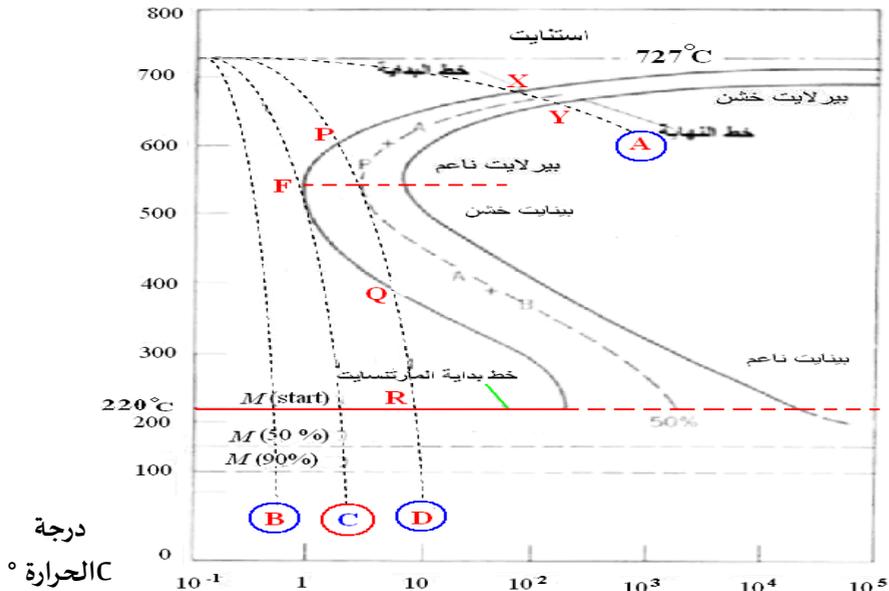
تبين منحنيات التحول TTT-curves البنيات المجهرية الناتجة من التحولات التي تتم عند درجات حرارة ثابتة وتحدد فيها فترة الحضانة (التشيع) التي لا بد من انقضاءها قبل بداية التحول. لكن يمكن الحصول على منحنيات التحول المعدلة التي تتم تحت ظروف التبريد المستمر بمعدل ثابت من أعلى من  $727^{\circ}\text{C}$  (مجال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

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

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

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

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



الزمن بالثانية (مقياس لوغاريتمي)

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

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

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

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

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

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

#### الثابتة:

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

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

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

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

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

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

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

#### مراجعة الأستنايت: Austempering

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

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

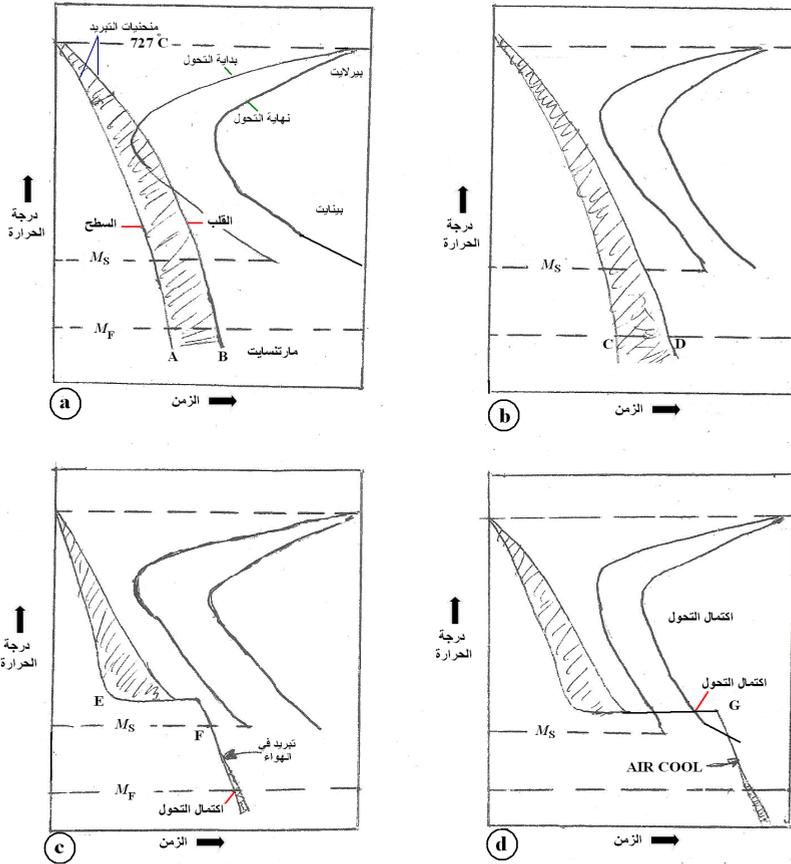
#### التخمير عند درجة الحرارة الثابتة: Isothermal annealing

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

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

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

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



### مراجعة الأستنايت Austempering مراجعة المارتنسايت Martempering

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

## الفصل السادس التصليد السطحي للفولاذ (الصلب الكربوني)

### The Surface Hardening of Steel

#### مقدمة:

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

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

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

#### فوائد التصليد السطحي:

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

#### التغليف السطحي: Case hardening

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

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

1. الكربنة السطحية. **Carburising**

2. النتردة السطحية. **Nitriding**

3. الكاربونتردة. **Carbonitriding**

الكربنة السطحية: **Carburising**

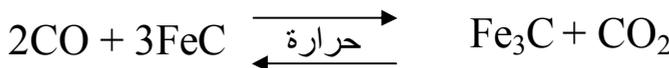
وهي العملية التي يتم فيها تشبيح سطح الفولاذ بالكربون دون داخل المعدن للحصول على التصليد المطلوب ومن ثم إجراء بعض المعالجات الحرارية بعد الكربنة. وتجرى عملية الكربنة في وسط صلب أو غازي أو سائل، وفي كل هذه الأحوال يتم تحرير الكربون الذري من الوسط الغني به لينتشر داخل سطح الفولاذ عند درجة حرارة وزمن كافيان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

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

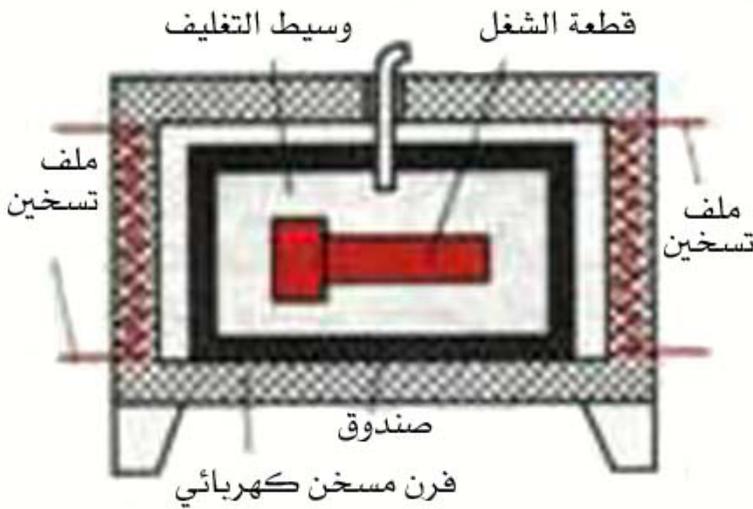
تسمى عادة بالكربنة بطريقة التعبئة **Packcarburising** حيث توضع الأجزاء المراد كربنتها في صناديق من الحديد الزهر أو صلب العدد مع المادة الكربونية على مسافات حوالي 50mm بين الأجزاء ثم تغطى الصناديق ويحكم غلقها بحشو أسمنتي مانع للتسرب (يمنع تسرب الكربون للخارج أو دخول الأكسجين من الجو)، وتسخن ببطء حتى درجة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

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

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



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



الشكل (1) الكربنة في وسط صلب

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

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



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

من مزايا التصليد بالسيانيد:

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

ومن عيوب التصليد بالسيانيد:

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

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

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

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

### النتردة السطحية: Nitriding

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

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

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

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



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

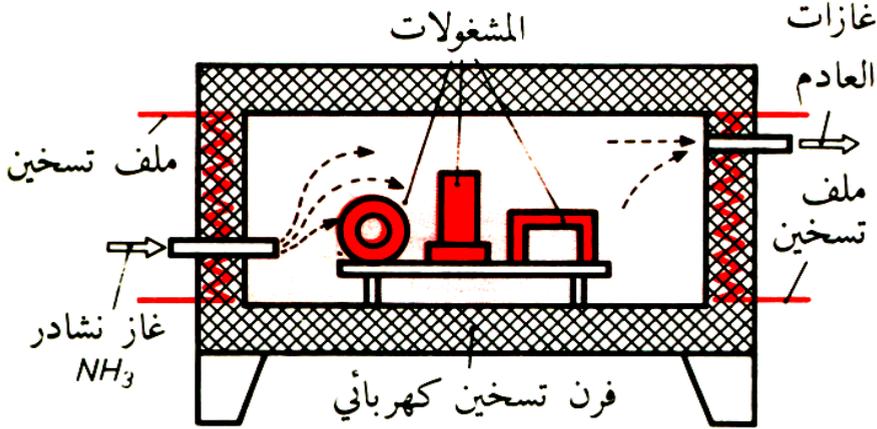
من مزايا عملية التردة:

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

عيوب عملية التردة:

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

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



الشكل (2) التصليد بالنتردة

### الكاربونتردة: Carbonitriding

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

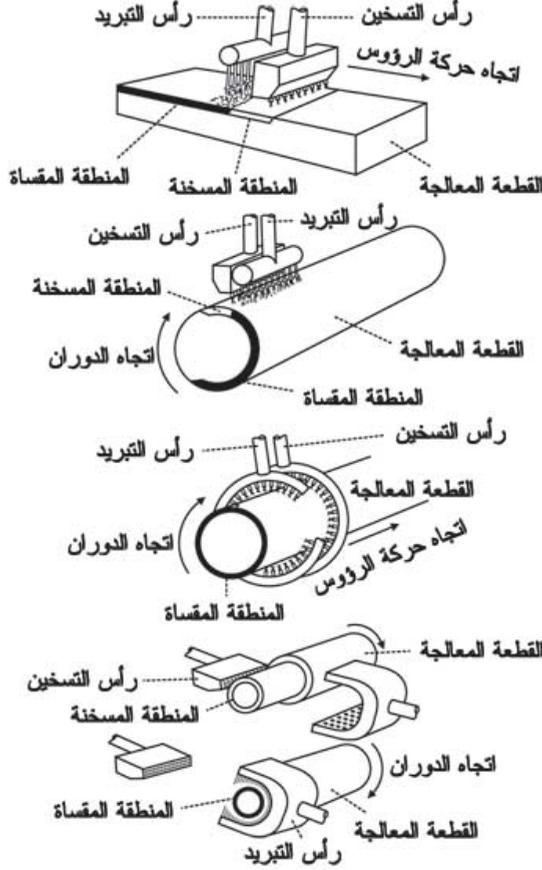
إضافة النترجين يزيد من سرعة إنتشار الكربون تحت درجة أقل من درجة الحرارة اللازمة لإنتشار الكربون أثناء الكرينة.

### التقسية السطحية باللهب: Flame hardening

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

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

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

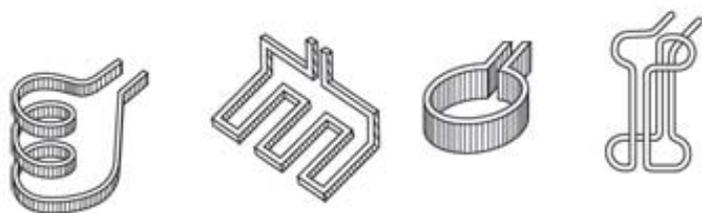
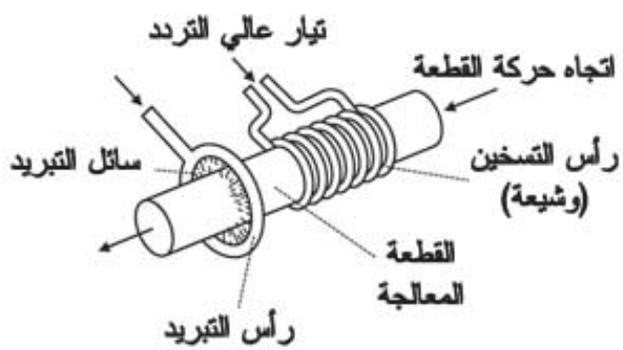


الشكل (3) التصليد بلهبه الأكسي أستلين

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

#### hardening

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



الشكل (4) التقسية بالتيارات الحثية

# الفصل السابع

## الصلب السبائكي

### The Alloy Steel

#### مقدمة:

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

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

#### أثر إضافة العناصر السبائكية للفولاذ:

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

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

#### The Effects on the Allotropic Transformation Temperature

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

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

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

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

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

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

## (3) التأثير على ثبات الكربيدات:

### The Effect on the Stability of the Carbides

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

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

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

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

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

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

#### The Improvement in Corrosion resistance

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

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

#### Effects on the Mechanical Properties

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

#### أهم العناصر السبائكية:

#### (1) المنجنيز (Mn):

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

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

#### (2) النيكل (Ni):

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

#### (3) الكروم (Cr):

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

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

#### (4) الموليبدنيوم (Mo):

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

#### (5) التنجستين (W):

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

## (6) السيلكون (Si):

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

### تصنيف الصلب السبائكي: Classification of Alloy Steel

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

(أ) فولاذ منخفض السبائكية Low alloy steel

(ب) فولاذ عالي السبائكية High alloy steel

فولاذ منخفض السبائكية:

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

فولاذ عالي السبائكية:

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

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

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

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

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

# الفصل الثامن

## الحديد الزهر

### The Cast Iron

#### مقدمة:

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

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

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

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

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

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

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

#### **الكربون: Carbon**

يوجد الكربون في الحديد الزهر في إحدى صورتين:

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

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

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

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

#### السيلكون: Silicon

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

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

#### الكبريت: Sulfur

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

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

### المنجنيز: Manganese

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

### الفسفور: Phosphorous

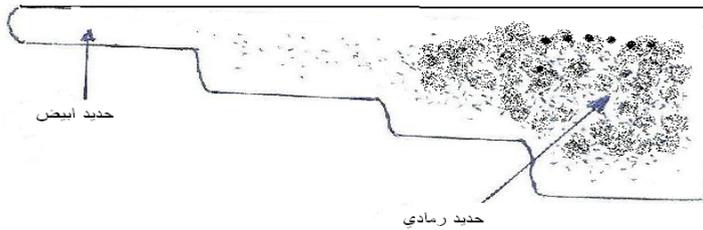
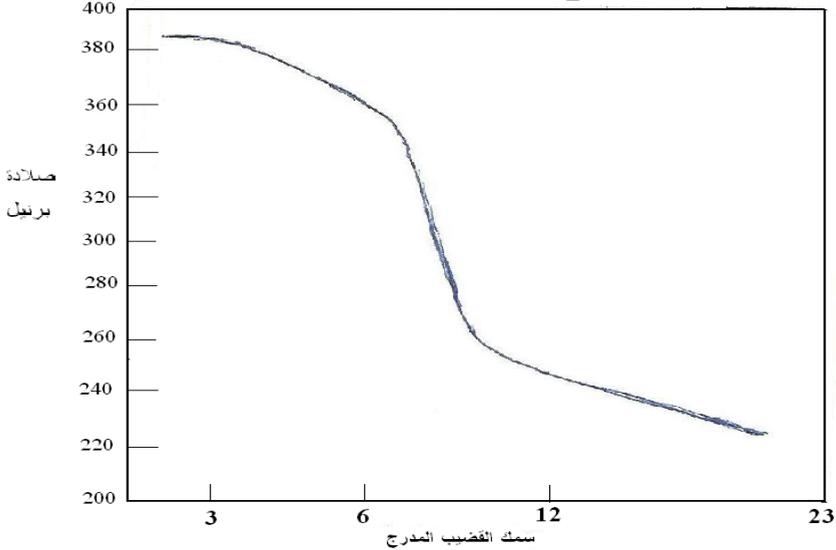
وجود الفسفور في الحديد الزهر ليس له تأثير على إستقرار السمنتايت لكنه يوجد في هيئة فوسفيد الحديد  $Fe_3P$  الذي يكون يوتكتيك مع الحديد في أنواع الحديد الزهر الرمادي ومع الفيررايت و السمنتايت في الحديد الزهر الأبيض. وتنصهر هذه المركبات الايوتكتيكية عند درجات حرارة أقل (حوالي  $950^{\circ}C$ ) مما يجعل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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

### أنواع واستخدامات الحديد الزهر:

تبعاً للخواص والإستخدام يمكن تصنيف الحديد الزهر إلى الآتي:

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

### الحديد الزهر الرمادي: Gray Cast Iron

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

## الحديد الزهر الأبيض: White Cast Iron

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

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

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

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

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

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

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

### المعالجة:

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

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

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

#### المعالجة:

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

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