الحديد و الفولاذ Iron and steel

١- مقدمة عامة:

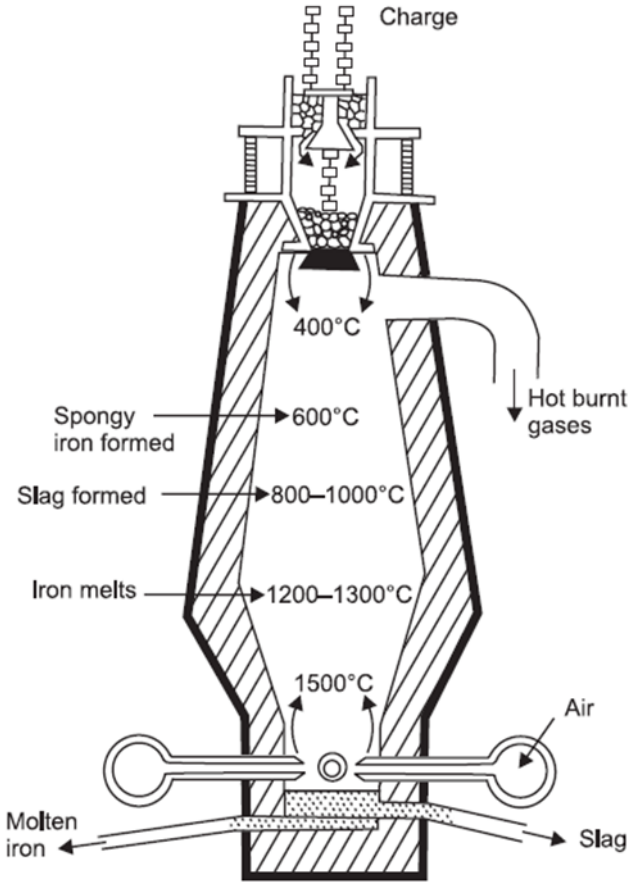
- يعود استخدام الحديد الى حوالي 1500 ق.م حيث أُستخدمت أفران بدائية لإنتاجه تعتمد على احتراق الفحم الحجري لتسخين الفلز الخام. بقي تصنيع المواد الحديدية يتم بكميات محدودة حتى القرن الثامن عشر حيث طُوّر الفرن العالي.
- انتشر استخدام المنتجات الحديدية بشكل واسع في النصف الثاني من القرن الثامن عشر و القرن التاسع عشر. اما انتاج الفولاذ فقد بدأ في منتصف عام 1800 م عندما تم اختراع محول بسمر (Besmer converter) .
- تطورت صناعة الفولاذ بشكل كبير من النصف الثاني من القرن التاسع عشر مع تطوير الفرن ذو (الاساس) التيار الاكسجيني و تطوير طرق الصب المستمر بالإضافة الى ادخال الاتمته في عملية الإنتاج مما أدى الى تقليل التكاليف.
- يُستعمل الفولاذ في العديد من المنشآت المدنية مثل الجسور، ناطحات السحاب الصالات الكبيرة و غيرها.

٢- صفات المواد الحديدية:

- تمتاز المواد الحديدية بالعديد من الصفات الجيدة مثل : المقاومة العالية، المتانة الجيدة، اللدونة، الناقلية العالية للحرارة و الكهرباء وقابليتها للحام.
- بالمقابل لهذه المواد بعض الصفات السلبية مثل: التآكل تحت تأثير الغازات المختلفة و الرطوبة و التشوه الكبير تحت تأثير درجات الحرارة العالية.

٣- مراحل صناعة الحديد و الفولاذ:

تتم عملية التصنيع وفقا للمراحل التالية:



١. ارجاع فلزات الحديد وتشكيل حديد الغفل (Pig iron)

٢. تكرير و تنقية حديد الغفل و تصنيع حديد الصب و الفولاذ.

٣. تصنيع المنتجات المتنوعة من الفولاذ و حديد الصب.

٣- ١ صناعة حديد الغفل Pig iron:

تتم عملية صناعة حديد الغفل عن طريق ارجاع فلزات الحديد الخام (الهيماتيت Fe_2O_3 ، المغنيتيت Fe_3O_4) بواسطة فحم الكوك ضمن الفرن العالي الذي تصل درجة حرارته الى حوالي 2200°C . يتم استخدام كربونات الكالسيوم الخام كمادة مذيبة (مسعدة على انصهار فلزات الحديد) و مزيلة لبعض الشوائي مثل أكسيد السيليس SiO_2 .

٣- ١-١ مراحل استخراج الحديد:

- طحن فلزات الحديد الخام الى قطع صغيرة (مكعبية، كريات) ابعادها حوالي 50mm و من ثم يتم تسخينها لإزالة الرطوبة منها.
- ادخال المواد الخام (فلزات الحديد، فحم الكوك، كربونات الكالسيوم) من فتحة في اعلى الفرن و من ثم تعرضها لتيار هوائي ساخن جدا قادما من اسفل الفرن مما يؤدي الى اشتعال الكوك و انصهار فلزات الحديد.
- تتم عملية ارجاع الحديد (تخليصه من الأكسجين) بواسطة فحم الكوك

- تقوم كربونات الكالسيوم بالإضافة الى دورها كمادة مذيبة بتنقية المصهور من أكسيد السيليس مشكلة خبث الافران العالية
- يتجمع الحديد المصهور و الحاوي على نسبة عالية نسبيا من الكربون في اسفل الفرن ، ليتم صبها ضمن قوالب خاصة (Pigs) مشكلة ما يُسمى بحديد الغفل.
- يطفو الخبث فوق مصهور الحديد ليتم بعد ذلك تبريده بالماء او الهواء و استخدامه كإضافات اسمنتية (منيرالية) او كحصويات خفيفة ضمن الخلطات الخرسانية.

ملاحظة 1 : يجب ان تحتوي فلزات الحديد الخام على نسبة من الحديد حوالي 65% .
ملاحظة 2 : يحتوي حديد الغفل على نسبة عالية من الكربون تراوح بين (3-5)% بالإضافة الى بعض الشوائب الأخرى من مثل (السيليكا، الكبريت المغنيزيوم، الفوسفور) التي تجعل منه مادة هشة قليلة الاستخدام. لذلك يتم اخضاعه لمرحلة ثانية من الانصهار و تنقية الشوائب و تحويله الى حديد الصب و الفولاذ القابلان للاستخدام و انتاج المنتجات الحديدية المتنوعة.

٣- ١-٢ التفاعلات الكميائية ضمن الفرن العالي:

- تصل درجة حرارة في أعلى الفرن الى 230°C وهي غير كافية لبدء عملية الارجاع (الاختزال) لكنها كافية للتخلص من الرطوبة الموجودة في المواد الخام.
- في الجزء الأوسط من الفرن يحترق الكوك احتراقا شديداً بمجرد ملامسته لتيار الهواء الساخن و يوفر الكربون اللازم لعملية الارجاع و يبدأ تشكل الحديد الاسفنجي عند درجة الحرارة 600°C وفقا للمعادلات التالية:

$$2\ C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$CO_2 + C \rightarrow 2\ CO$$

$$Fe_2O_3 + 3\ CO \rightarrow 2\ Fe + 3\ CO_2$$

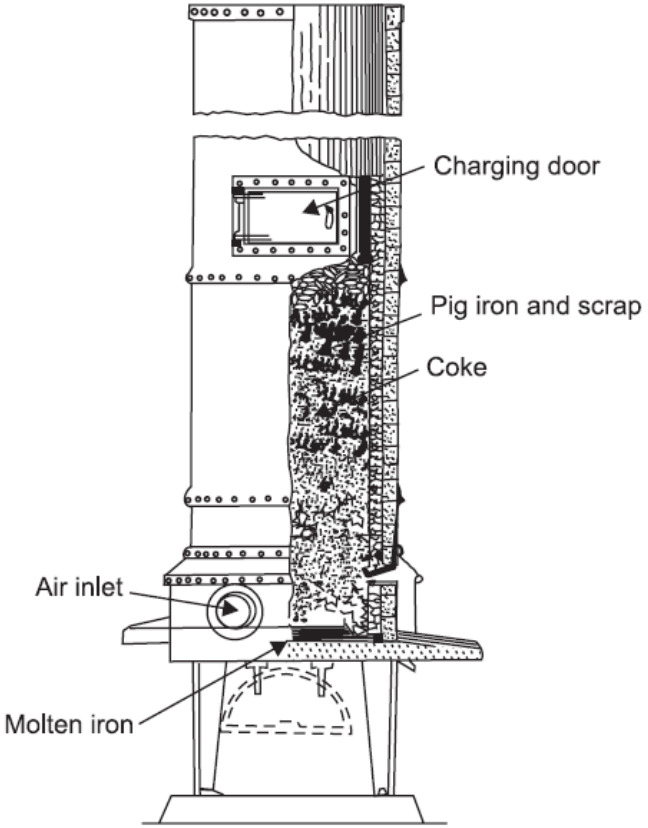
- عند درجة الحرارة **1000°C** ويتشكل الكلس الحي و فقاً للمعادلة التالية:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

- يتفاعل الكلس الحي مع أكسيد السيليس ليكون خبث الحديد وفقا للمعادلة التالية:

$$CaO + SiO_2 \rightarrow CaSiO_3$$

- في الجزء السفلي من الفرن مع وصول درجة الحرارة الى **1200°C** تنصهر جميع المكونات ماعدا الكوك الذي يتفاعل مع الأكاسيد غير المختزلة و يبدأ مصهور الحديد بالتشكل .
- في اسفل الفرن يتجمع الحديد المصهور و التي يتحول عند صبه و تبريده الى حديد الغفل و يطفو فوقه الخبث كونه ذو كثافة أقل.



٣- ١-٣ مواصفات حديد الغفل:

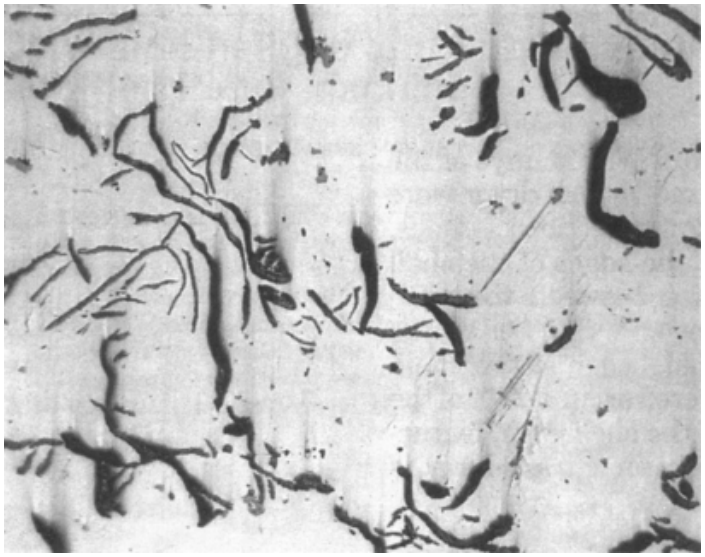
- حديد الغفل : قاسي، هش، درجة انصهاره حوالي **1200°C** .
- مقاومته للضغط عالية و مقاومته للشد و القص ضعيفة.
- لا يصدأ و لا يمكن برشمته او لحامه.

٣- ٢ صناعة حديد الصب Cast iron:

يُصنع حديد الصب من خلال إعادة صهر حديد الغفل مع الكوك و كربونات الكالسيوم ضمن فرن الكوبلا **(Cupola Furnace)** . بعدئذ يتم صب المصهور ضمن قوالب بأشكال و أحجام مرغوبة. يُعرف الحديد الناتج بحديد الصب ،الحاوي على نسبة كربون بين **(2-4)%** . يتصف حديد الصب بقساوته و هشاشته

٣- ٢ -١ أنواع حديد الصب:

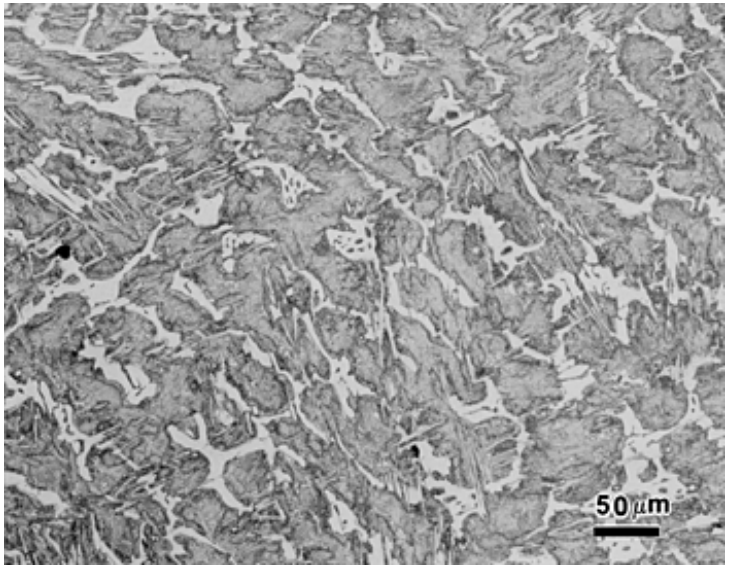
١- حديد الصب الرمادي:



ينتج عن التبريد البطيء للحديد المصهور و المصبوب بالقوالب وفق الأشكال المرغوبة. يكون الكربون ضمن هذا النوع على شكل صفائح منفصلة من الغرافيت تؤثر بشكل كبير على الخواص الميكانيكية لهذا النوع من الحديد.

يحتوي حديد الصب الرمادي على نسبة من الكربون تتراوح بين 2.7-4% بالإضافة لبعض الشوائب الأخرى من مثل المنغنيز، السيليس و الكبريت والفوسفور و غيرها.

٢- حديد الصب الأبيض:



نحصل عليه من التبريد السريع للحديد المصهور حيث يبقى الكربون موزعا ضمن الحديد على شكل سيمنتيت (كربيد الحديد) Fe_3C . يكون لون هذه النوع من الحديد فاتحا بسبب غياب الغرافيت.

نسبة الكربون ضمنه بحدود 2.5% بالإضافة لبعض الشوائب الأخرى من مثل المنغنيز، السيليس الكبريت و الفوسفور وغيرها.

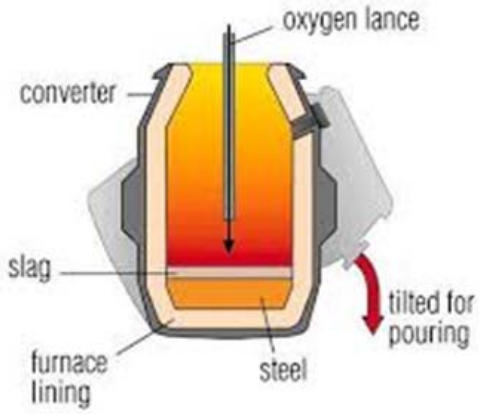
٣- ٢ - ٢ استخدامات حديد الصب:

يُستخدم حديد الصب في صناعة أغطية الريكارات، أجزاء من محركات السيارات، الانابيت ، وصلات الانابيب، قواعد الخطوط الحديدية و غيرها.

٣- ٣ صناعة الفولاذ Steel:

يُعتبر الفولاذ مادة مواد البناء الأكثر ملائمة بين المواد المعدنية بفضل خواصها الفيزيانية و الميكانيكية الجيدة و المتنوعة. يُصنع الفولاذ باستخدام نوعين من الأفران: أفران التيار الاكسجيني، أفران القوس الكهربائي.

١- أفران الأساس (التيار) الاكسجيني (محول أكسجيني):



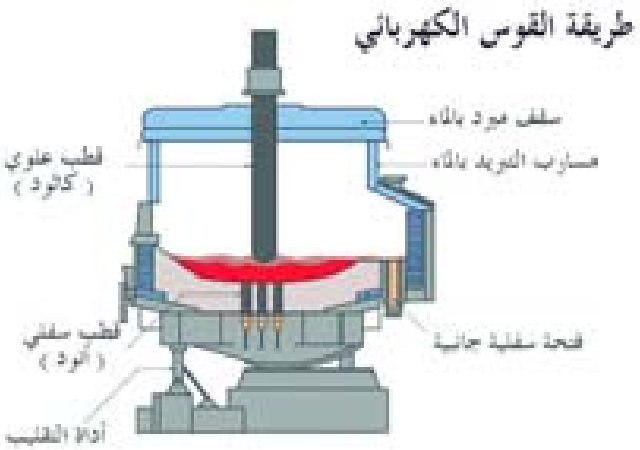
في هذا النوع من الأفران يتم التخلص من نسبة الكربون الزائدة الموجودة في حديد الصب الناتج عن فرن الكوبولا، عن طريق امرار تيار من الاكسجين ضمن المصهور فيتفاعل الاكسجين مع الكربون ليشكل غاز الكربون كما في المعادلة التالية:

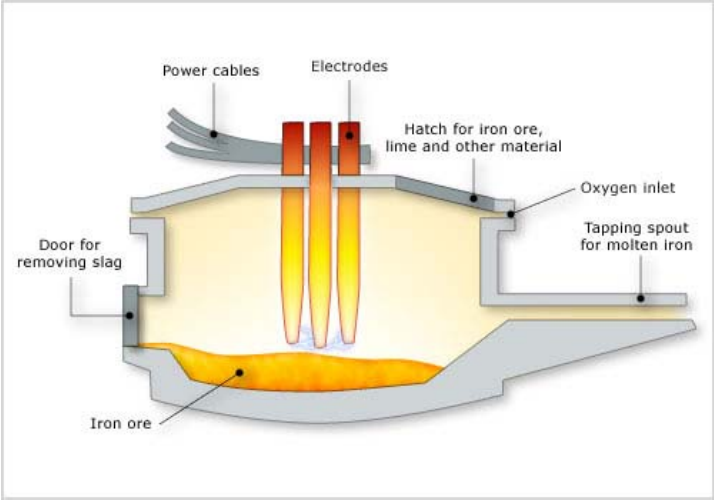
$$2Fe[C] + O_2 \leftrightarrow 2Fe + 2CO$$

تستمر عملية ضخ تيارات الاكسجين بشكل متتالي حتى التخلص من جميع الشوائب و الوصول الى نسبة الكربون المناسبة.

٢- فرن القوس الكهربائي

تتم عملية الصهر اما باستخدام القوس الكهربائي المباشر الواصل بين الكترود من الفحم و المواد الحديدية الداخلة الى الفرن او باستخدام القوس الكهربائي غير المباشر و في هذه الحالة فان القوس الكهربائي يصل بين الكترودين من الغرافيت أو اكثر و من ثم تشع الحرارة الى المواد الحديدية الداخلة للفرن .





ملاحظة: في أثناء انتاج الفولاذ يمكن للأكسجين أن ينحل في المصهور و عند البدء بعملية التصلب يمكن للاكسجين أن يتحد مع الكربون ليشكل فقاعات من احادي أكسيد الكربون، تُحجز ضمن الفولاذ و تشكل نقاط الضعف التي يبدأ منها الانهيار.

للتخلص من هذه الفقاعات يتم إضافة بعض المواد مثل الألمنيوم، المنغنيز التي تعمل على منع عملية الأكسدة.

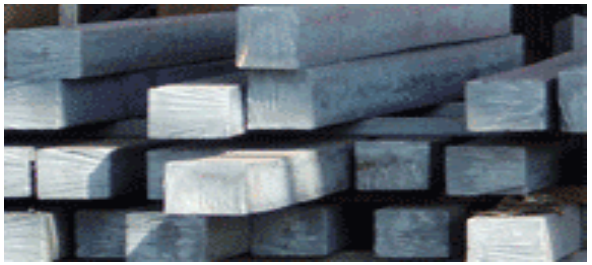
يُسمى الفولاذ الخالي من الأكاسيد بالفولاذ المقتول Killed steel

٤- تشكيل الفولاذ:

يتم صب الفولاذ المصهور ذي التركيب المرغوب ضمن مصبوبات كبيرة (Ingots) ليصار لتحويلها لمنتجات نصف مصنعة لها ثلاثة أشكال ألواح (slabs) ، كتل (Blooms) ، نورات (billets). , هنا يوجد طريقين:

١.تشكيل هذه المنتجات على الساخن مباشرة بعد عملية الصب و هذا ما يُعرف بطريقة الصب المستمر . لقد أصبحت هذه الطريقة أساسية في تصنيع منتجات الفولاذ المتنوعة لما توفره من طاقة.

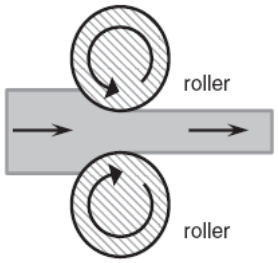
٢.ترك المنتجات تبرد و من إعادة تشكيلها على السخن و هذا يتطلب إعادة تسخينها قبل البدء بتشكيلها.



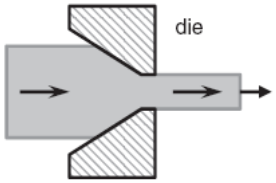
blooms

slabs

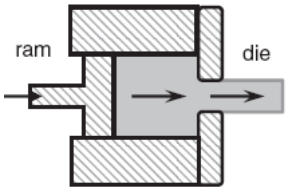
billets



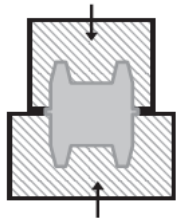
Rolling



Drawing



Extrusion



Forging

تتم عملية تشكيل الفولاذ بأربع طرق:

١.الدرفلة rolling .

٢.الطرق Forging .

٣.البثق Extrusion .

٤.السحب Drawing .

ما يهمنا من هذه الطرق الأربعة، طريقة الدرفلة فقط

٥- درفلة الفولاذ :

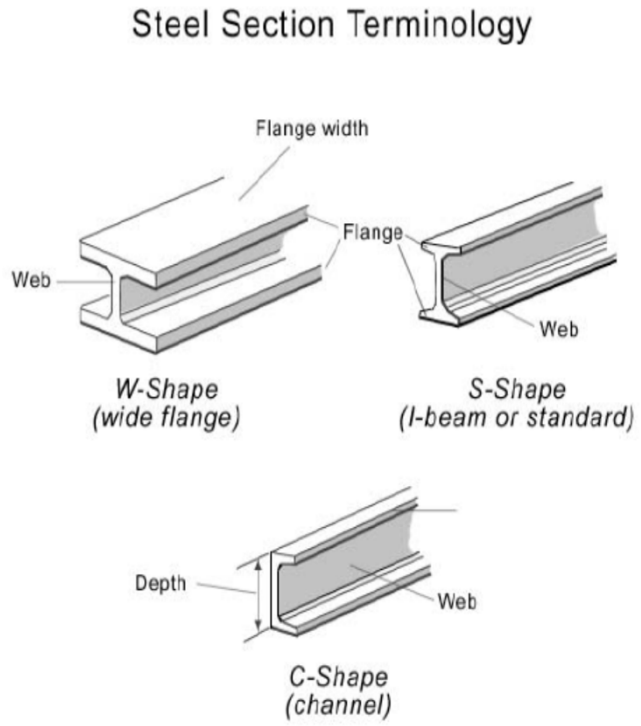
هي احدى طرق تشكيل الفولاذ حيث يتم تقليل سماكته (تسطيحه) و زيادة طوله و عرضه عن طريق تمرير الفولاذ الساخن أو البارد عبر اجسام اسطوانية (رولات) ثقيلة و صلدة تُسمى الدرافل.

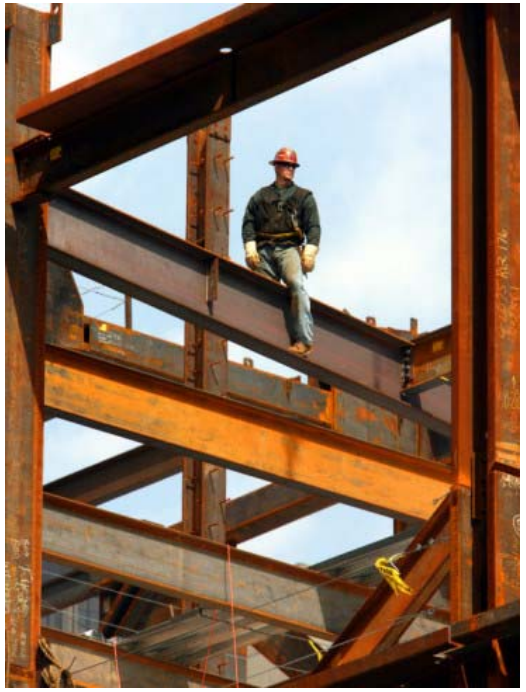
يوجد نوعين للدرفلة: درفلة عل الساخن و درفلة على البارد.

٥-١ درفلة الفولاذ على الساخن :

تتم في درجة حرارة أعلى من 0.6 درجة الانصهار للفولاذ المشكل. تُستخدم هذه الطريقة لتشكيل المقاطع الثقيلة.

تتصف العناصر المشكلة بهذه الطريقة بعدم الدقة بالأبعاد و بقاء اجهادات ضمن المعدن بسبب التبريد غير المتجانس الذي تخضع له.





٥- ٢درفلة الفولاذ على البارد :

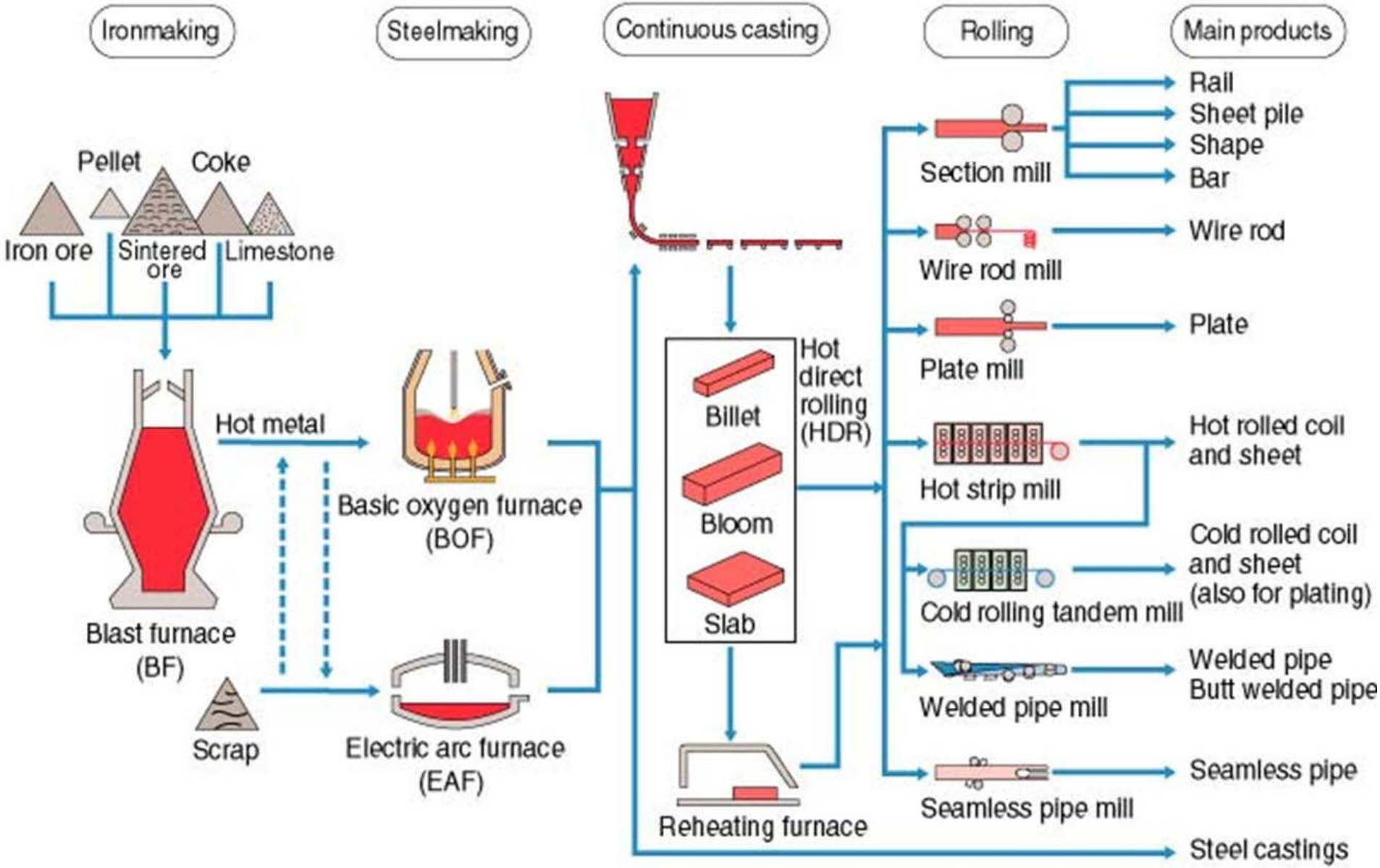
تم العملية بدرجة حرارة الغرفة و تتطلب استخدام معدات ثقيلة لتامين قوى كبيرة تكون كافية للتغلب على مقاومة الخضوع لمادة المشكلة. تستخدم هذه الطريقة لتشكيل العناصر ذات المقاطع الصغيرة و تمتاز بانها تحسن مقاومة الشد و تؤمن الحصول على ابعاد دقيقة للناصر المشكلة و تؤمن استوائية جيدة لسطح المنتج.

٦- المعالجة الحرارية للفولاذ:

تهدف المعالجة الحرارية الى تغيير خواص الفولاذ مثل: زيادة المتانة، زيادة الصلادة، زيادة المطيلية، إزالة الاجهادات الداخلية الناتجة عن عمليات التشكيل.

يتمثل مبدأ المعالجة الحرارية بتسخين الفولاذ الى درجة حرارة معينة ومن ثم المحافظة على هذه الدرجة لفترة محددة يليها تبريد المادة بنسبة محددة.

تشمل المعالجة الحرارية العمليات التالية: التقسية Hardening ، التخمير (التلدين) Annealing ، المعادلة أو الاستعدال Normalizing ، المراجعة (التطبيع) Tempering


Ironmaking
Steelmaking
Continuous casting
Rolling
Main products
Pellet
Coke
Iron ore
Sintered ore
Limestone
Hot metal
Blast furnace (BF)
Basic oxygen furnace (BOF)
Scrap
Electric arc furnace (EAF)
Billet
Bloom
Slab
Hot direct rolling (HDR)
Reheating furnace
Section mill
Rail
Sheet pile
Shape
Bar
Wire rod mill
Wire rod
Plate mill
Plate
Hot strip mill
Hot rolled coil and sheet
Cold rolling tandem mill
Cold rolled coil and sheet (also for plating)
Welded pipe mill
Welded pipe
Butt welded pipe
Seamless pipe mill
Seamless pipe
Steel castings

٦- ١ التخمير:

له عدة أنواع ووفقاً لكل نوع يتم تسخين الفولاذ الى درجة حرارة معينة (اعلى من درجة تشكل الاوستنيت بحوالي 50°C في حالة التخمير الكامل و في بقية الأنواع الى درجة حرارة بين (600-700°C)) ومن ثم المحافظة على درجة الحرارة لفترة زمنية كافية لحدوث التحولات المرغوبة في بنية الفولاذ ثم عملية تبريد مضبوطة للوصول الى درجة حرارة الغرفة

تهدف هذه المعالجة الى إزالة الاجهادات الداخلية و إعادة التبلور و نمو حجم الحبيبات و زيادة مطيلية الفولاذ و متانته

٦- ٢ المعادلة:

تشبه هذه العملية عملية التخمير الكلي مع اختلاف بدرجة الحرارة و طريقة التبريد، فدرجة الحرارة أعلى بحدود 60°C من درجة الحرارة الحرجة العليا (خط الاوستينييت)، أما التبريد فيتم بالهواء الساكن ضمن الغرفة (أسرع من حالة التخمير الكامل) و هذا يجعل المقاطع المختلفة السماكة اقل تجانساً.

يتم الحصول على مقاومة شد و صلادة أعلى مع خواص تشغيلية افضل من تلك التي يتم الحصول عليها من التخمير الكلي.

٦- ٣ التقسية (السقاية):

يتم في هذه العملية تسخين الفولاذ الى درجة حرارة أعلى من درجة الحرارة الحرجة العليا ومن ثم المحافظة على هذه الدرجة لفترة معينة يلي ذلك عملية تبريد سريع للفولاذ من خلال وضعه أو رشه بالماء او بالماء الحاوي ملح او بالزيت أو بالهواء المضغوط وفقاً للسرعة المطلوبة.

يكون سطح الفولاذ المقسى بهذه الطريقة أكثر قساوة و هشاشة من داخله نتيجة تبريده بسرعة أكبر من الداخل.

تؤدي عملية التبريد السريع الى وضع الفولاذ بحالة تشوه قد ينتج عنها تشققات او انكسار في الزوايا الحادة مع انتهاء عملية التقسية، لذلك يجب اتباع هذه المرحلة بمرحلة المراجعة بهدف تحسين مواصفات الفولاذ المقسى (متانة قليلة)

٦- ٤ المراجعة:

تهدف هذه العملية الى زيادة متانة الفولاذ المقسى و أيضا زيادة مطيليته من خلال أعاد تسخينه بعد تبريد الى الدرجة 40°C عن طريق غمره بالزيت او املاح النترات و تركه في درجة الحرارة العالية لمدة ساعتين و من ثم تبريده بالهواء الساكن.

٧- تصنيف الفولاذ حسب التركيب الكيميائي:

يُصنف الفولاذ الى صنفين: الفولاذ الكربوني، الخلائط الفولاذية.

بشكل عام تكون نسبة الكربون في الفولاذ أقل من 2%

٧- ١ الفولاذ الكربوني Carbon steel .

يُصنف الى:

١.فولاذ منخفض الكربون Low carbon وتكون فيه نسبة الكربون أقل 0.15%

٢.فولاذ عادي الكربون Mild carbon ، تكون فية نسبة الكربون تتراوح بين 0.15-0.29%

٣.فولاذ متوسط الكربون Medium carbon تكون فيه نسبة الكربون تتراوح بين 0.3-0.59%.

٤.فولاذ عالي الكربون High carbon تكون فيه نسبة الكربون تتراوح بين 0.6-1.7% .

٧- الخلائط الفولاذية Steel alloys.

تُصنع هذه الخلائط بإضافة مواد الى الفولاذ لهدف تحسين بعض الخواص مثل : المقاومة، المطيلية، مقاومة التآكل وغيرها. من المواد المضافة يمكن أن نذكر : الالمنيوم، النيكل، النحاس، المنغنيز و غيرها. ضمن الخلائط يمكن ان يتواجد الكربون بنسب مختلفة.

تُصنف الخلائط الى: منخفضة Low alloy و عالي High alloy

٨- الفولاذ الانشائي:

١. يشمل المقاطع الثقيلة المتنوعة مثل : الأعمدة، الجسور، الزوايا ، التي يتم درفلتها على الساخن. يتم تصنيع هذه العناصر بأشكالها المتعددة من الفولاذ الكربوني أو الخلائط المنخفضة، يوجد لكل منها مواصفات خاصة بها تحدد حد سيولتها، مقاومتها، استطالتها، تركيبها الكيميائي.

٢. فولاذ التسليح العادي و الفولاذ الخاص (المسبق الاجهاد) الذي يتم استخدامه في الخرسانة لتعويض النقص في مقاومتها للشد. يوجد عدة أشكال لفولاذ التسليح العادية، اما ان تكون قضبان ذات نتوءات (محلزنة او متقطعة) أو قضبان ملساء او شبكات ملحومة ذات نتوءات او ملساء.

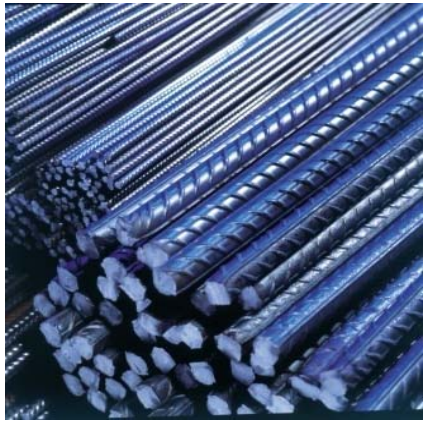
يُصنع فولاذ التسليح العادي من خلال الدرفلة على الساخن للنورات غالبا (لأنه في بعض الاحيان يمكن استخدام الخلائط في عملية التصنيع) للحصول على القضبان بالأقطار المرغوبة. بعد ذلك و لأجل زيادة المقاومة و التخلص من العيوب للقضبان يمكن ان تتم من احدى العمليات التالية:

- إضافة مواد محسنة للمقاومة (مثل Vanadium)
- تبريد سريع و مراجعة
- درفلة على البارد.
- سحب على البارد

وفقا للمواصفة ASTM يوجد اربعة مواصفات لفولاذ التسليح العادي وفقا لنوع الفولاذ المستخدم في التصنيع هي: A615, A616, A617, A706 . تميز هذه المواصفات بين ثلاثة درجات (رتب) للفولاذ مرتبطة بحد مرونته. هذه الدرجات هي : Grade40, 60,75

الخواص الميكانيكية للفولاذ الأكثر استخداما وفقا للكود العربي السوري للخرسانة

الأسياخ أو القضبان	نوع الفولاذ (الصلب) والرمز	الحد الأدنى لمقاومة الشد (الانقطاع) f_{su} MPa	الحد الأدنى لإجهاد الخضوع أو 0.2% إجهاد الضمان MPa	النسبة المئوية الدنيا للاستطالة عند الانقطاع
ملساء	فولاذ طري ϕ	370	240	*20
ذات نتوءات (ذات أضلاع)	فولاذ طري متوسط المقاومة H	440	300	*16
عالية المقاومة ذات نتوءات	فولاذ طري عالي المقاومة T	500	400	*12
عالية المقاومة ذات نتوءات	فولاذ قاس معالج على البارد Y	500	400	*10



ملاحظة ١ : اقطار القضبان المعتمدة في الكود العربي السوري للخرسانة هي : 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 40 mm

ملاحظة ٢ : عند استعمال قضيب ذات نتوءات، يؤخذ القطر النظري للدائرة التي تعطي الوزن الذاتي للمتر الطولي اذا كانت النتوءات مستمرة، و اذا كانت النتوءات متقطعة يؤخذ أصغر مقطع للقضيب.

٣. فولاذ الخرسانة المسبقة الاجهاد: تتطلب الخرسانة المسبقة الاجهاد استخدام أسلاك، جدائل، كابلات، قضبان حاصة من الفولاذ الذي يجب ان يكون عالي المقاومة و ذو نسبة استرخاء منخفضة. يُصنع الفولاذ من خلائط عالية المحتوى من الكربون و عالية المقاومة.

الاسترخاء: يُعرف بأنه نسبة النقص في الاجهاد عند تطبيق نسبة ثابتة من التشوه (الانفعال) لفترة زمنية طويلة.

تُحدد المواصفة ASTM A416 مواصفات فولاذ الخرسانة المسبقة الاجهاد و تميز بين رتبتين Grade 250, 270.

٩- اختبارات الفولاذ:

٩- ١ اختبار الشد:

الغاية من التجربة:

يهدف هذا الاختبار الى تحديد مواصفات الفولاذ الميكانيكية من مثل : حد المرونة (اجهاد الخضوع) ، مقاومة الشد، التطاول النسبي، مقدار انخفاض مساحة المقاطع المختبرة و غيرها.

مبدأ التجربة:

اخضاع عينة نموذجية من الفولاذ الى حمولة شد محورية متزايدة بانتظام من الصفر وحتى الانقطاع.

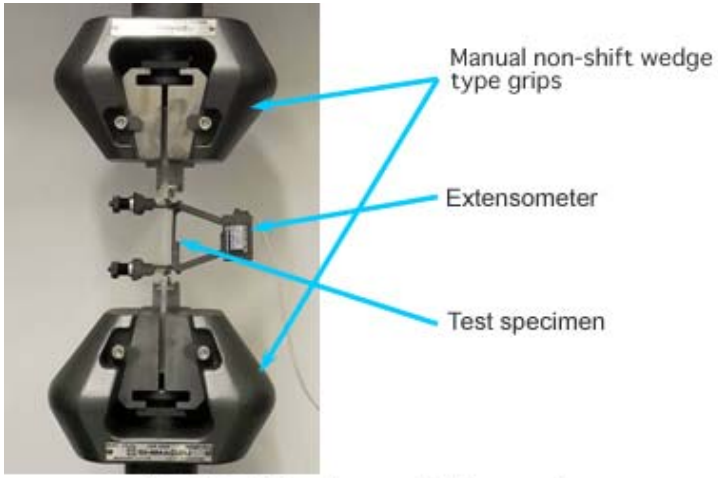


Fig. 2 Test Specimen and Extensometer

الأجهزة:

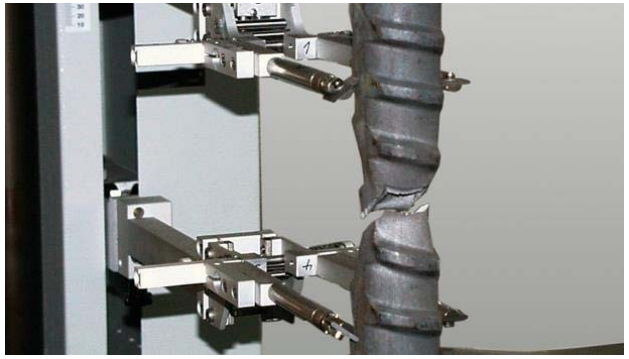
١. آلة شد لها القدرة على تطبيق حمولة شد محورية بنسبة محددة مزودة بلوحة الكترونية، كما يمكن وصلها لشاشة كومبيوتر حيث يمكن رسم مخطط القوة التطاول و مخطط الاجهاد التشوه.

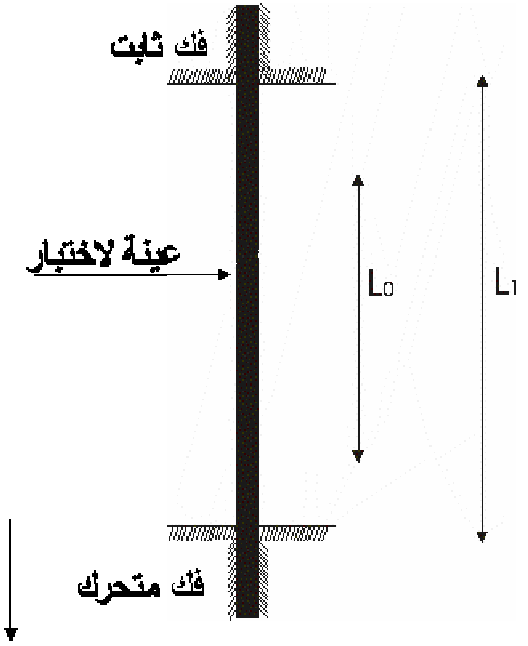
٢. فكين لتثبيت العينة احدهما ثابت و الآخر متحرك يعملان على نقل حملة الشد من الة الشد الى العينة.

٣. جهاز قياس التشوهات يُثبت على العينة المختبرة

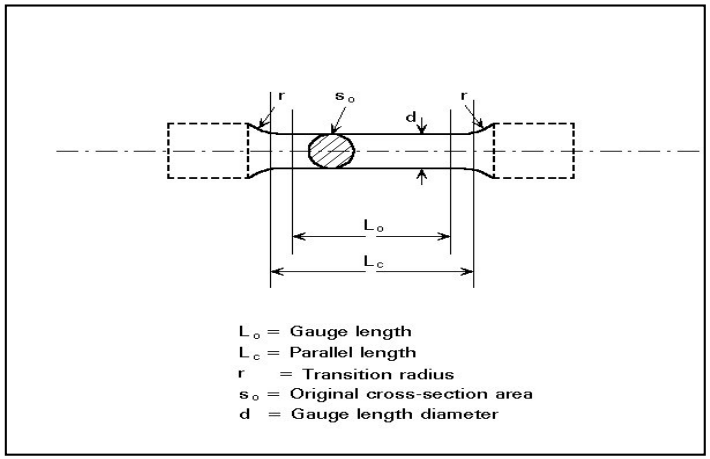
٤. جهاز قياس ابعاد العينة (البياكوليس).

٥. جهاز قياس الاستطالة (Extensometer)





عينات الاختبار:



عينات الاختبار:

١. يجرى الاختبار على قضبان ذات مقاطع دائرية أو مربعة او على صفائح ذات سماكات متنوعة.

٢. يجب ان تكون العينة المختبرة ممثلة بشكل جيد للفولاذ المراد اختباره.

٣. يجل ان تكون ابعاد العينة معتمدة في المواصفات العالمية.

٤. لكي يحدث الانقطاع في وسط العينة، يكون مقطعها في القسم الأوسط أصغر من مقطعها في الاطراف

٥. نحدد على العينة طول القياس (L_o) (الطول المرجعي المستخدم في حساب التطاول النسبي للعينة) و مرتبط بقطر العينة او مساحة مقطعها S_o.

طول القياس يعادل خمس اضعاف القطر الاسمي للعينة او $5.65\sqrt{S_o}$

٦. نحدد طول القياس على العينة بشكل موازي لمحور العينة الطولي .

مراحل الاختبار :

١. تحديد طول القياس على طول العينة المختبرة عن طريق رسم خطاً موازياً للمحور الطولي للعينة مساوياً لطول العينة بالحبر أو الخدش أو الدهان.

٢. تثبيت العينة بين فكي الجهاز.

٣. تثبيت مقياس التشوه على العينة

٤. البدء بتطبيق الحمولة المتزايدة بانتظام من الضفر حتى الانقطاع وفقاً لنسبة محددة حسب المواصفة المعتمدة

٥. وفقاً للمواصفة الامريكية ASTM E8 فانه يتم تسجيل الحمولة و التشوية عند كل تغير بالحمولة يُعادل 2.2kN

تحليل نتائج الاختبار :

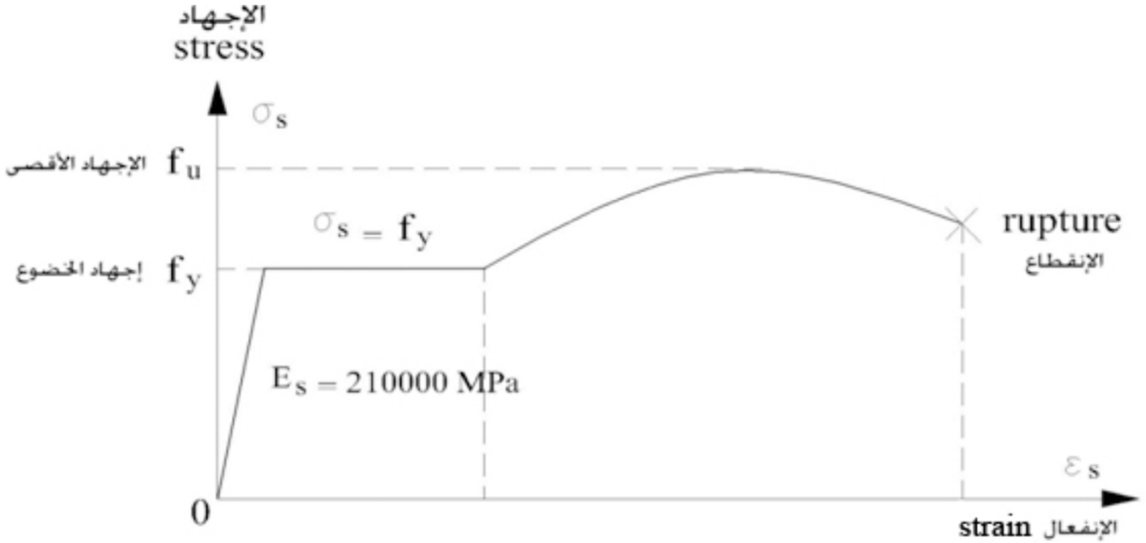
١- مخطط الاجهاد –التشوه النسبي (الانفعال):

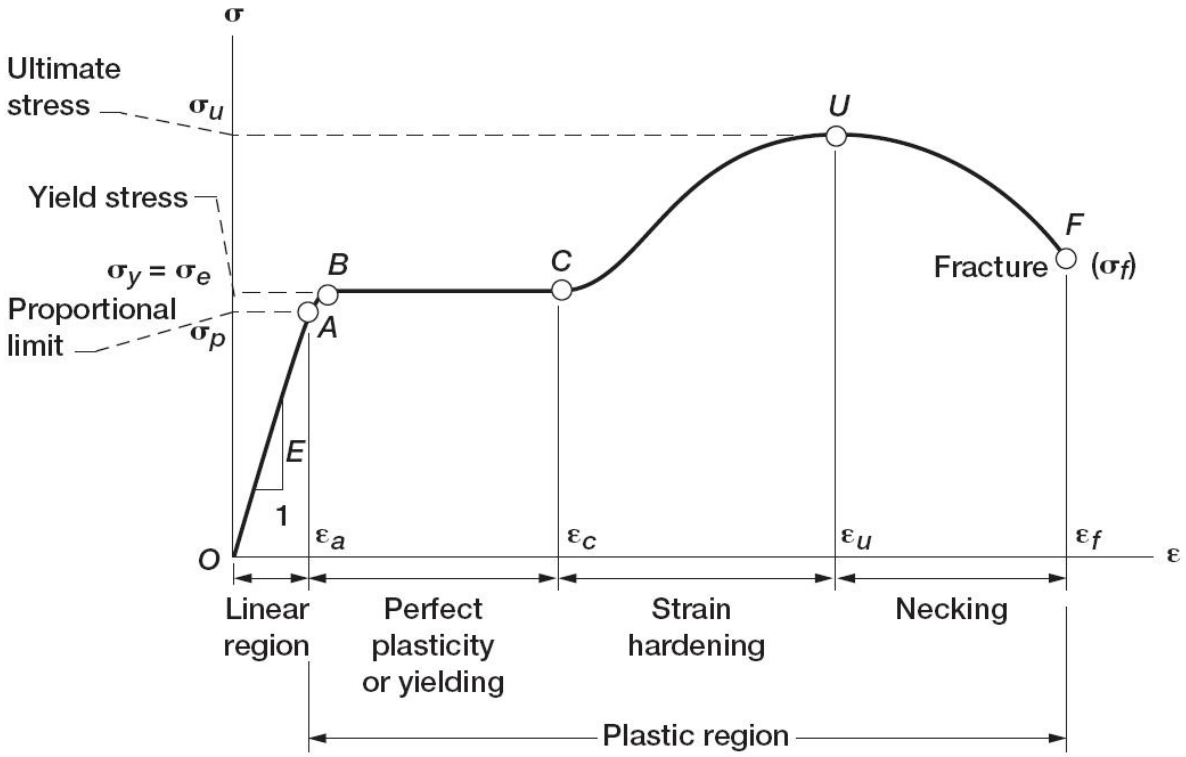
١. نحسب و نرسم مخطط الاجهاد - التشوه المتوافق لكل تغير بالحمولة بمقدار **2.2kN** . الاجهاد يُحسب من خلال تقسيم الحمولة على مساحة مقطع العينة المختبرة، اما التشوه النسبي فنحصل عليه من خلال تقسيم التغير في الطول على الطول الأصلي (طول القياس للعينة) .

ملاحظة: في الوقت الحالي يمكن الحصول على مخطط الاجهاد- التشوه النسبي (σ-ξ) مباشرة على شاشة الحاسوب مباشرة اثناء التجربة.

٢. نميز على مخطط الاجهاد-التشوه النسبيي للفولاذ المطاوع و الحاوي على نسبة قليلة من الكربون أقل من 0.25%، المراحل التالية :

٣. مرحلة المرونة الخطية (linear elastic region) : تكون فيها العلاقة بين الاجهاد و التشوه النسبي علاقة خطية تناسبية بشكل طردي . تؤدي إزالة الحمولة في أي نقطة الى ازلة التشوهات المسجلة و عودة العينة الى وضعها الاصلي





٤. تنتهي هذه المرحلة بنقطة (A) تُسمى حد المرونة التناسبي (الحقيقي) (proportional limit) . بعد هذه النقطة تصبح العلاقة غير خطية. من الصعب تحديد هذه النقطة على المخطط.

٥. على المخطط ، يمكن ان نميز النقطة (B) التي تُسمى حد المرونة الظاهري أو حد السيلان أو اجهاد الخضوع (Yield stress) ، حيث تنتقل بعدها المادة الى مرحلة اللدونة (plastic region)

٦. تتصف مرحلة المرونة ببقاء جزء من التشوهات بعد ازالة الحمولة تُسمى التشوهات اللدنة (plastic region)

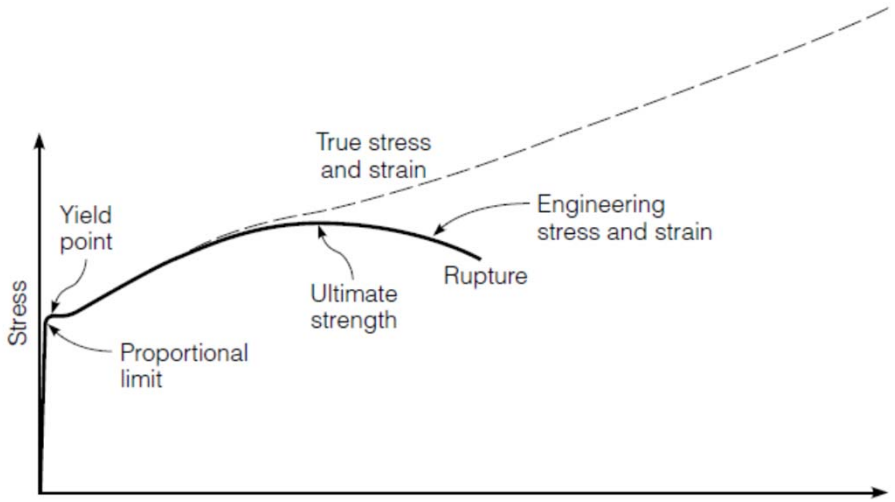
٧. نميز ضمن مرحلة اللدونة ثلاثة أجزاء:

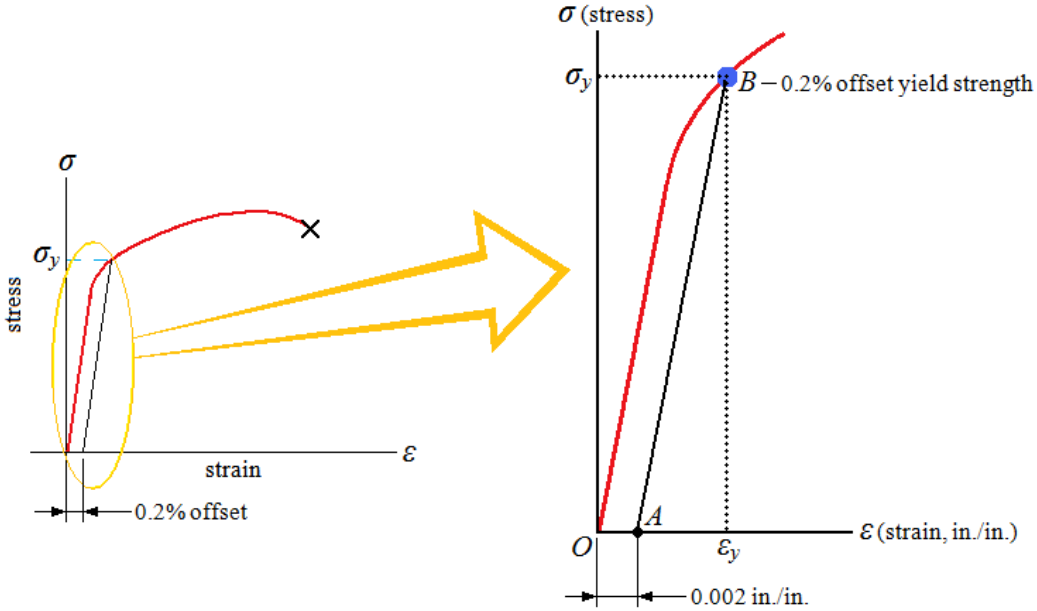
- لدونة تامة (perfect plasticity) تتميز هذه المرحلة بزيادة التشوهات المسجلة دون زيادة في قيمة الاجهادات وهو ما يُعرف بسيلان العينة .
- مرحلة تصلب التشوه (strain hardening) : تتميز هذه المرحلة بإعادة انتظام و توضع جديد للبلورات وهذا يسبب ازدياد مقاومة العينة حتى الوصول الى النقطة (U) التي الاجهاد الحدي (الأعظمي) (ultimate stress) .
- مرحلة التضايق (necking) :تتميز هذه المرحلة بتسارع التشوهات المسجلة و تضايق مقطع العينة و من ثم انقطاعها في النقطة (F) التي تمثل حد الانقطاع (Fracture stress) .

ملاحظات على مخطط الاجهاد- التشوه النسبي:

١. لقد افترضنا في حساب الاجهادات ان مقطع العينة الأصلي (A0) يبقى ثابتا ، ولكنه في الحقيقة يتضايق تدريجياً مع تزايد القوة المطبقة و بالتالي فات الاجهادات الفعلية المطبقة على المقطع تكون اكبر من الاجهادات المحسوبة. كما ان التشوه الفعلي اكبر من التشوه المحسوب لان التزايد في الطول في المنطقة المجاورة للتضايق اكبر من التزايد في الطول في المنطقة البعيدة عن منطقة التطاول. و بالتالي يمكن ان نميز بين مخطي اجهاد- تشوه نسبي: الأول: مخطط الاجهاد- التشوه النشبي الهندسي (Engineering stress-stain) و الثاني مخطط الاجهاد- التشوه النسبي الفعلي (True stress- strain) .

٢. عندما تزداد نسبة الكربون في الفولاذ تزداد مقاومته و يقل التشوه النسبي (يصبح قصيفاً) ، يكون من الصعب تحديد اجهاد الخضوع من المخطط (أي التمييز بين مرحلة المرونة و مرحلة اللدونة) فنحدد ما يُسمى اجهاد الضمان (حد المرونة الاتفاقي) و الذي يُعرف بانه الاجهاد الذي يترك تشوهاً نسبياً (انفعالاً) متبقياً مقداره 0.2%





حسابات تجربة الشد :

اجهاد الخضوع:

يتم تحديده من المخطط او باستخدام الطريقة الاصطلاحية.

مقاومة الشد:

تُحسب من العلاقة :

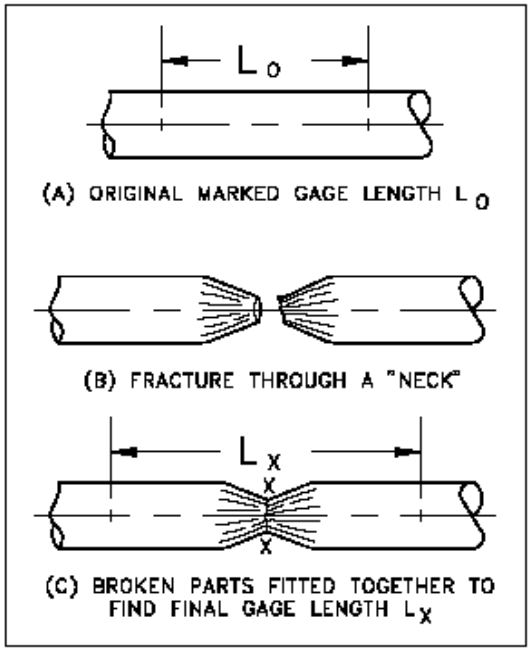
$$\sigma = \frac{P_{max}}{A_0}$$

حيث:

σ : مقاومة الشد Mpa .

P_{max} :القوة العظمى التي تتحملها العينة اثناء التجربة N .

A_0 : مساحة مقطع العينة الأصلي mm^2 .



الاستطالة:

تُحسب من العلاقة :

$$\varepsilon\% = \frac{L_s - L_0}{L_0} * 100$$

حيث:

ε : التشوه النسبي.

L_s :طول القياس بعد الانقطاع mm.

L_0 : طول القياس الأصلي mm .

ملاحظة: يُحدد طول القياس بعد الانقطاع بإعادة جزئي العينة الى وضعيتهما قبل الانقطاع و الضغط عليهما و من ثم قياس الطول.

معامل المرونة (معامل يونغ):

يُحسب من علاقة هوك :

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

حيث:

E : معامل المرونة MPa .

σ :اجهاد المرونة النظري (حد المرونة التناسبي) MPa.

ε : التشوه النسبي (الانفعال) الموافق لحد المرونة النسبي.

اجهاد الانقطاع (الانكسار)

تُحسب من العلاقة :

$$\sigma_f = \frac{P_f}{A_0}$$

حيث:

σ : مقاومة الشد Mpa .

P_f :قوة الانكسار N .

A_0 : مساحة مقطع العينة الأصلي mm^2 .

نسبة تضايق المقطع:

تُحسب من العلاقة :

$$\text{نسبة التضايق } \% = \frac{A_0 - A_s}{A_0} * 100$$

حيث:

A_s :مساحة المقطع بعد الانقطاع mm^2 و يحسب بقياس القطر او البعد الوسطي للمقطع الأصغر للعينة المنكسرة.

A_0 : مساحة المقطع الأصلي mm^2 .

تطبيق:

قضيب من الفولاذ طوله 100mm و مقطعه مستطيل بعداه (40x10)mm ، خضع لقوة شد مقدارها 89kN فأدت الى حدوث استطالة في القضيب مقدارها 0.1mm . بفرض ان هذه الاستطالة مرنة بشكل كامل, و كثافة الفولاذ تعادل $7.85g/cm^3$. احسب معامل مرونة الفولاذ ووزن المتر الطولي.

ملاحظة: يُحسب وزن المتر الطولي من العلاقة التالية :

$$Mass\ per\ unit\ length(kg) = 7.85 * 10^{-3} * A_n$$

حيث:

A_n :مساحة المقطع القضيب mm^2.

الحل:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{89*10^3}{40*10} = 222.5\ \text{MPa}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{0.1}{100} = 0.001$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{222.5}{0.001} = 222500\text{MPa} = 222.5\text{GPa}$$

وزن المتر الطولي $= 7.85 * 10^{-3} * 10 * 40 = 3.14kg$