

Traitements thermiques

2.1. Définition

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage et de maintien, suivies de refroidissement, qui ont pour but :

- a. D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :
 - Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , $A\%$ en donnant une meilleure tenue de l'élément.
 - Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.
- b. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.
- c. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant d'être soumis à une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

Un traitement thermique ne modifie pas la composition chimique de l'alliage, mais il peut apporter des modifications relatives aux trois points de vue suivants :

- Constitution (état du carbone, forme allotropique du fer)
- Structure (grosseur du grain et répartition des constituants)
- Etat mécanique (état des contraintes)

2.2. Procédés des traitements thermiques

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de :

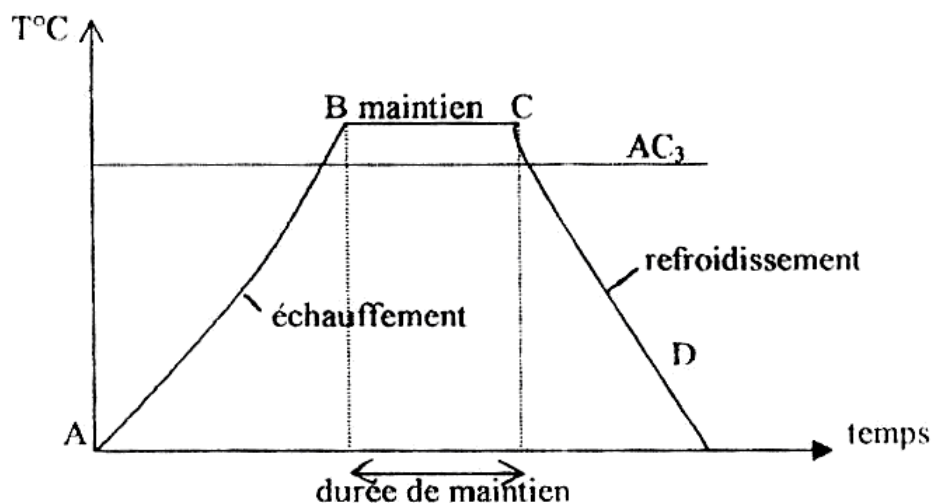


Fig.2.1. Cycle de traitement thermique

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC₃).
- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - Lente (dans le four, à l'air).
 - Assez rapide (dans l'huile).
 - Très rapide (dans l'eau).

2.2.1. Chauffage des pièces

Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité. Il existe deux possibilités pour le chauffage des pièces :

- **Par transmission de la chaleur** : On distingue trois possibilités

Par conductibilité : La pièce est chauffée dans un four ordinaire où elle est en contact qu'avec le sol du four, elle ne reçoit par conductibilité qu'une petite quantité de la chaleur dépensée.

Par convection : Dans ce cas, la pièce est chauffée par contact avec un fluide chaud (gaz ou liquide) qui se déplace et lèche la pièce en lui cédant une grande partie de la chaleur dépensée.

Par rayonnement : La chaleur absorbée par les parois et la voûte du four est rayonnée vers la pièce qui l'absorbe. C'est le cas où l'apport de chaleur est le plus important.

- **Par production de la chaleur dans la pièce** :

C'est une possibilité de chauffer la pièce en créant dans cette dernière un flux de courant, soit par l'utilisation de la pièce comme conducteur dans un circuit électrique (chauffage par résistance) ou l'emplacement de la pièce dans un champ variable (chauffage par induction).

Les difficultés qui peuvent se présenter lors d'un chauffage rapide sont les fissures et étirages des pièces à la suite de la différence de dilatation de la couche extérieure et du cœur de la pièce où se créent des contraintes pouvant provoquer des fissures pour des températures basses et des déformations plastiques pour des températures élevées.

Les facteurs principaux, qui influent sur le chauffage de la pièce sont le diamètre (épaisseur), conductibilité, température du four, etc. En général le régime de chauffage pour les aciers est déterminé selon le diamètre de la pièce et les caractéristiques qui sont définis par le carbone équivalent.

$$C_{\text{équivalent}} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{3} + \frac{Ni}{10} + V + \frac{Si - 0,5}{5} + \frac{W}{10} + \frac{Ti}{5} + \frac{Al}{10}$$

Pour les différents chauffages, on peut choisir les vitesses suivantes :

- Chauffage lent : 3 à 10°C/min.
- Chauffage technique conventionnel (normal) : 50°C/s.
- Chauffage rapide : > 50°C/s.

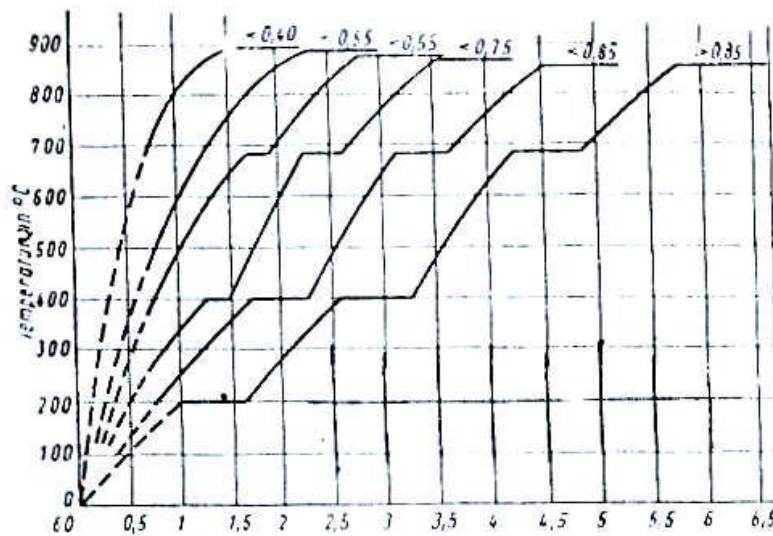


Fig.2.2. Temps de chauffage en min, recommandés pour revenu normal et trempe en dépendance de C_{eq} pour une pièce de diamètre 60 mm.

2.3. Transformations isothermes

Le diagramme d'équilibre indique la constitution normale de l'acier, constitution d'équilibre, pour les différentes températures. L'expérience prouve que cette constitution n'est acquise que si la température varie assez lentement pour donner aux transformations le temps de s'effectuer. Pour décrire l'allure cinétique des transformations, on utilise le diagramme TTT (fig.2.3).

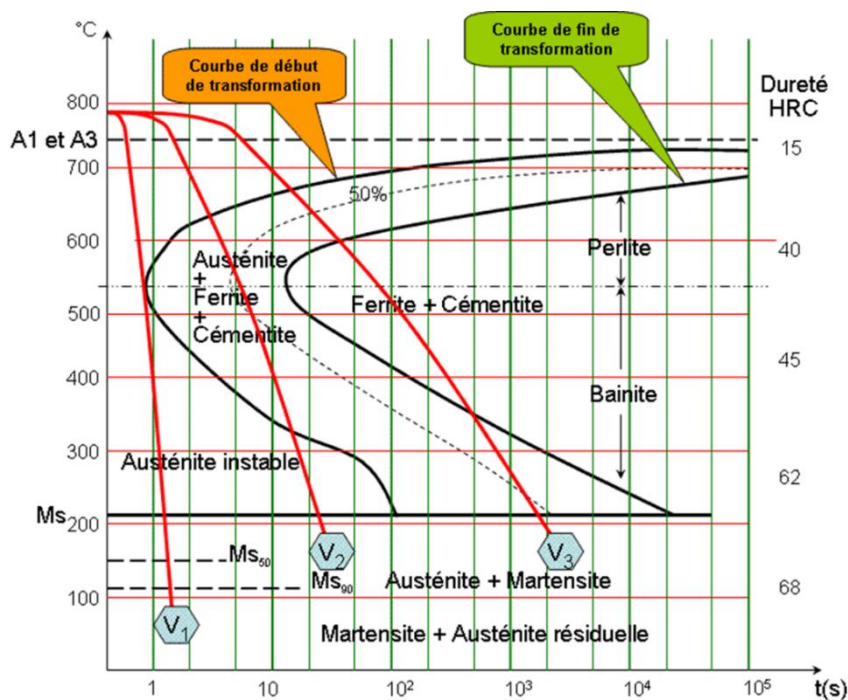


Fig.2.3. Diagramme TTT

Le diagramme de transformation isotherme (Temps, Température, Transformation), dont les abscisses indiquent le temps et les ordonnées la température, la courbe de gauche montre le début de la transformation de l'austénite en mélange mécanique et la courbe de droite montre la fin de la transformation de l'austénite.

Le domaine situé à gauche de la courbe gauche détermine la durée d'incubation dans l'intervalle de température et de temps déterminés, pendant lesquels la transformation ne se produit pas, (l'austénite est à l'état surfusionné et ne se décompose pas). C'est la période d'incubation qui caractérise la stabilité de l'austénite surfusionnée. Quand l'acier est surfusionné à un petit degré, le nombre de germes est petit et le temps d'incubation est grand.

Au fur et à mesure de l'augmentation du degré de surfusion, le nombre de germes augmentent et le temps d'incubation diminue.

L'abaissement de la température provoque une diminution de la vitesse de diffusion et la stabilité de l'austénite augmente au dessous de 555°C, la limite supérieure du diagramme TTT est donnée par le point A1 aux environs de 720°C et la limite inférieure par le point de martensite M_s .

A droite de la courbe de droite sont données les différentes structures à obtenir et entre les deux courbes (partie hachurée) la transformation de l'austénite est saisie.

Dans le diagramme TTT existe trois domaines de températures ou zones de transformation :

- Domaine perlitique (au-dessus de 550°C).
- Domaine bainitique (intermédiaire) entre 550 et 200°C.
- Domaine martensitique au-dessous de 200°C.

2.3.1. Transformation perlitique

Pour des températures de transformation entre 720°C et 450°C (phase perlitique), débute la transformation par la formation des premiers germes de cémentite sur les joints des cristaux de l'austénite, ces germes se développent à l'intérieur des cristaux γ et le voisinage des cristaux de cémentite s'appauvrit en carbone et se fustige en ferrite α . La solubilité du carbone dans la ferrite est très faible, ce qui conduit à la précipitation du carbone se trouvant dans la ferrite dans le domaine de l'austénite voisin et ce qui donne la formation de la perlite ($Fe\alpha + \text{cémentite}$). La figure 2.4 donne les différentes étapes de la formation de la perlite (transformation austénite en perlite).

Une petite surfusion donne un petit nombre de germes de cémentite avec des lamelles épaisses, mais quand la vitesse est assez considérable, c'est à dire le degré de surfusion est élevé, dans ce cas le nombre de grains est plus grand et les lamelles de la perlite sont plus fines c'est à dire on a le constituant Sorbite ou Troostite.

La perlite, la sorbite et la troostite se distinguent l'une de l'autre par l'épaisseur des lamelles. Dans la perlite, leur dureté est aussi différente :

- Perlite : HB 200.

- Sorbite : HB 300.
- Troostite : HB 400.

La sorbite et la troostite sont des perlites très fines obtenues par vitesses de refroidissement assez importantes. La distance entre les lamelles est déterminée par la vitesse de diffusion du carbone dans l'austénite. Cette distance diminue avec l'augmentation de la température, ce qui conduit à l'obtention de lamelles épaisses (faible dureté).

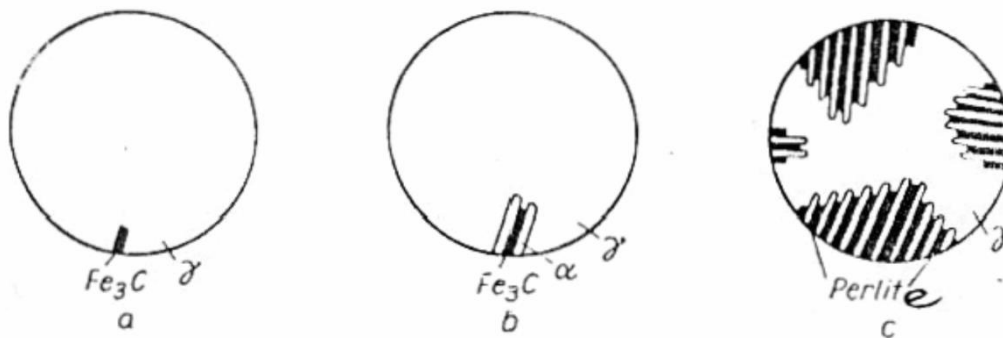


Fig.2.4. Transformation perlitique

2.3.2. Transformation bainitique

Comme pour la transformation perlitique, l'austénite se décompose en deux phases par diffusion, mais cette diffusion ne se produit pas jusqu'à la fin et la phase de la ferrite, dans ce cas, elle représente une solution solide de carbone dans le fer α , mais elle est sursaturée lors de la transformation bainitique. On peut arriver au fait qu'il reste une quantité de l'austénite résiduelle, qui peut se transformer en martensite lors d'un refroidissement ultérieur.

Pour des surfusions très élevées, entre 400°C et le point M_s (transformation bainitique) se forme la bainite à partir de l'austénite. Les températures très basses empêchent la diffusion du carbone dans l'austénite (elle est pratiquement arrêtée), le début de la décomposition se ralentit et la durée de la transformation augmente. La représentation schématique de la formation de la bainite (transformation austénite bainite) est donnée par la figure 2.5.

A partir des joints des grains de l'austénite se forment les cristaux sursaturés de ferrite dans le carbone, lesquels se développent au fur et à mesure. Le carbone se précipite sous forme de cristaux de cémentite lamellaire ou globulaire car la vitesse de diffusion du carbone dans la ferrite est grande par rapport à celle de l'austénite. Plus la température de formation de la bainite est basse, plus la vitesse de diffusion du carbone dans le réseau α est petite et les cristaux de cémentite dans la ferrite deviennent fins.

Donc la bainite est comme la perlite, elle se compose de ferrite et de cémentite, mais elle ne se forme pas directement à partir de l'austénite, mais suivant presque la même transformation que celle de la martensite, elle possède une dureté assez élevée. Le carbide formé dans la bainite supérieure

possède de gros grains par rapport à celui formé dans la bainite inférieure. La bainite supérieure est moins dure malgré sa formation à la température basse.

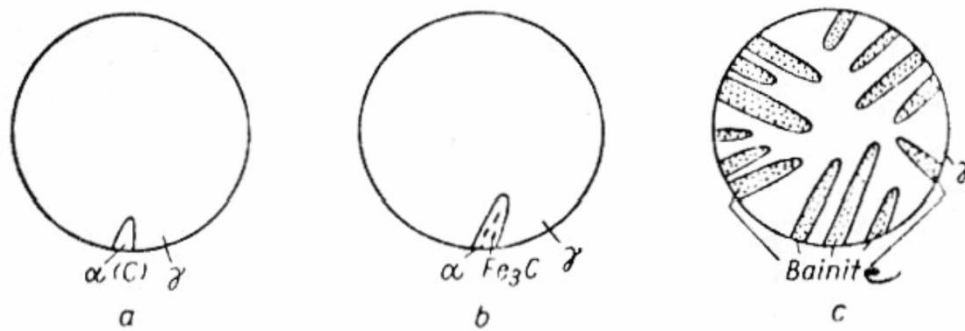


Fig.2.5. Transformation bainitique

2.3.3. Transformation martensitique

C'est au-dessous d'une température d'environ 180°C que se forme la cémentite à partir de l'austénite surfusionnée. Lorsque la température de l'austénite surfusionnée diminue jusqu'à environ $T\ 180^\circ\text{C}$, ou même plus bas, le processus de diffusion est complètement arrêté et une transformation sans diffusion se produit, elle est appelée transformation martensitique.

La martensite est une solution solide de carbone dans le fer α mais très saturée, son réseau cristallin est très distorsé (déformé). La transformation martensitique se produit sans déplacement des atomes de carbone, seulement les atomes de fer qui se déplacent à une distance plus petite que la distance interatomique, cette transformation se produit très vite.

Les points de début et fin de transformation dépendent du pourcentage de carbone, avec l'augmentation du % C, les points M_f et M_s diminuent.

La martensite a une structure très dure, le phénomène de durcissement a un caractère physico-chimique avec le réseau cristallin du fer α très déformé par la présence des atomes de carbone ce qui explique son durcissement.

Quand la température du milieu de trempe est supérieure au point M_f , l'austénite ne se transforme pas complètement en martensite, d'habitude il y a une certaine quantité d'austénite résiduelle. Elle est instable et lors des basses températures elle peut donner la martensite. Cette transformation provoque des déformations plastiques, donc l'austénite résiduelle dégrade les propriétés de la structure en diminuant la dureté (tenue à l'usure). Pour des températures $T < 100^\circ\text{C}$, la martensite et l'austénite sont très stables et on a plus de transformation de structure.

2.4. Variation de la grosseur du grain d'austénite en fonction de la température

En élevant la température ou en prolongeant la durée de séjour à la température donnée, on déclenche une cristallisation qui grossit le grain austénitique. Cette croissance est spontanée car le

système à tendance à diminuer l'énergie libre en réduisant la surface des grains. Les gros grains se développent aux dépens des petits grains thermodynamiquement moins stables.

Au refroidissement, le grain se stabilise, tel qu'il se présente au moment où le métal repasse par la température AC3, les dimensions des grains ne varient plus quel que soit la vitesse de refroidissement.

Donc la grosseur du grain d'austénite réel est déterminée par la température de chauffage, la durée de séjour à cette température et l'aptitude de l'acier à la croissance du grain pendant l'échauffement.

Un acier est dit "surchauffé" lorsque son échauffement jusqu'à une température nettement supérieure à AC3, reste prolongé, ceci conduit à un grossissement du grain austénite aussi bien à cette température de maintien, qu'après refroidissement à la température ambiante. La surchauffe peut être corrigée par un traitement thermique d'affinage structural.

Un acier est dit "brûlé" lorsque la température de chauffage est plus poussée et l'atmosphère est oxydante. La brûlure est un défaut irréparable à cause de la formation des oxydes de fer aux joints de grains.