

TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS

I - Traitements volumiques

1 Trempe

C'est un traitement thermique de durcissement consistant à chauffer la pièce à une température supérieure à la ligne de transformation fer $\alpha \rightarrow$ fer γ (austénisation), puis on lui fait subir un refroidissement rapide pour obtenir une dureté maximale.

1.1 Trempe martensitique

Elle provoque l'apparition d'une structure martensitique ayant une dureté très élevée. Les lois de refroidissement peuvent être continues ou discontinues.

1.2 Trempe bainitique

C'est une austénisation suivie d'un refroidissement rapide jusqu'à θ_b (température de trempe bainitique), maintenue pendant le temps nécessaire à la transformation complète de l'austénite. On refroidit ensuite jusqu'à température ambiante.

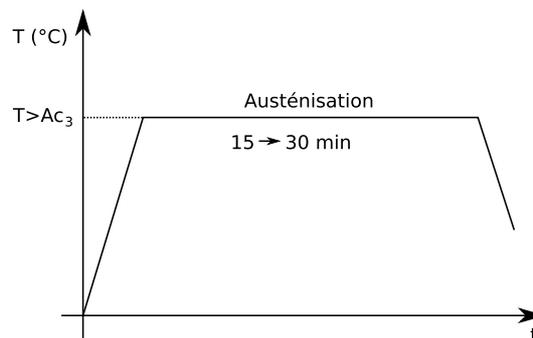
1.3 Trempe de aciers austénitiques ou hypertrempe

Sur certains aciers austénitiques, cette trempe crée une structure d'austénite homogène à température ambiante. Elle provoque l'adoucissement du matériau (comme certains aciers inox). Elle se produit si la température de trempe est trop élevée.

1.4 Cycle de trempe

On cherche à obtenir la transformation de l'austénite (stable à température élevée) en constituants métastables (pas stables mais la très faible vitesse de réaction donne une apparence de stabilité) : solution sursaturée de carbone dans le fer α . Le cycle de trempe comprend 2 étapes : l'austénisation puis le refroidissement.

1.4.1 Austénisation



Chauffage jusqu'à une température élevée permettant la formation de l'austénite. Il est nécessaire d'avoir :

- une température uniforme dans toute la pièce
- un maintien en température assez long pour permettre une homogénéisation complète de l'austénite.

La température d'austénisation dépend de la teneur en carbone et des éléments d'addition. La durée de maintien est variable, elle dépend beaucoup de la géométrie de la pièce. Elle se situe en général entre 15 et 30 minutes.

1.4.2 Refroidissement

But : transformer l'austénite en martensite ou bainite, plus durs. La méthode de refroidissement dépend du constituant et de la structure souhaitée.

1.5 Qualité de trempe

Facteurs influençant la qualité de la trempe :

- pouvoir refroidissant du bain
- masse de la pièce : plus la pièce est grosse, plus le refroidissement n'est pas homogène.
- conductibilité thermique
- état de surface

1.6 Aptitude à la trempe

L'aptitude d'une pièce à la trempe dépend :

- de l'intensité du durcissement : correspond à la dureté maximale (martensite) que l'on peut espérer. Elle dépend de la teneur en carbone en solution dans l'austénite.
- de la trempabilité : variation de dureté entre le coeur et la surface d'une pièce. Elle dépend des quantités de carbone et des éléments d'alliages en solution dans l'austénite.

La trempabilité dépend :

- de la composition chimique
- des conditions d'austénisation
- de la grosseur du grain austénitique

1.7 Recommandations

Il faut éviter les chocs thermiques (fissuration...)

La température de chauffage se situe entre 30 et 75 °C au dessus de la ligne AC_3 (850 → 900 °C). Pour les aciers rapides ou les inox, la température d'austénisation peut atteindre 1300 °C.

Le temps de maintien ne doit pas être trop court pour permettre une austénisation complète, pas trop long pour éviter une augmentation de la grosseur du grain qui diminuerait la dureté finale.

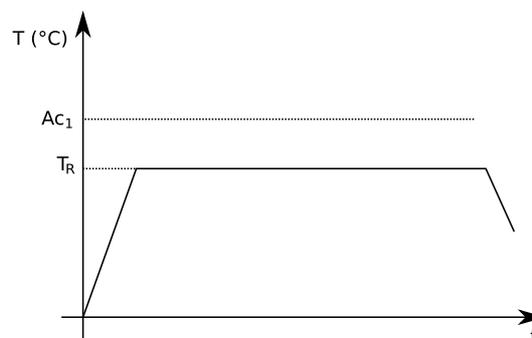
Attention aux variations de refroidissement entre le coeur et la surface de la pièce.

La trempe se situe entre l'ébauche et la finition.

2 Revenu

La trempe crée une structure martensitique très dure, donc très fragile. Le but du revenu est de modifier la structure pour obtenir un bon compromis dureté/fragilité. Le revenu diminue aussi les contraintes résiduelles de trempe.

2.1 Cycle de revenu



- Chauffage jusqu'à $T_R < AC_1$ pour l'acier considéré
- maintien à la température T_R
- refroidissement

La température de revenu se situe entre 200 et 500 °C, elle dépend des caractéristiques finales que l'on veut obtenir. Pour les aciers fortement alliés, la température de revenus est plutôt entre 550 et 650 °C.

2.2 Structure du matériau

Après la trempe, on obtient un mélange de :

- martensite
- austénite résiduelle (non transformée pendant le revenu)
- bainite (éventuellement)
- carbures

Pendant le revenu :

- la martensite se transforme en ferrite et en carbures
- l'austénite résiduelle se transforme en martensite et en bainite

On obtient un changement de propriétés par changement de structures.

2.3 Types de revenus

* Revenu de durcissement (ou durcissement structural) : provoque la précipitation des éléments carburigènes pendant le maintien en température.

* Revenu de détente : favorise la relaxation¹ des contraintes dues à la sursaturation en carbone du fer α . Température : entre 100 et 200 °C.

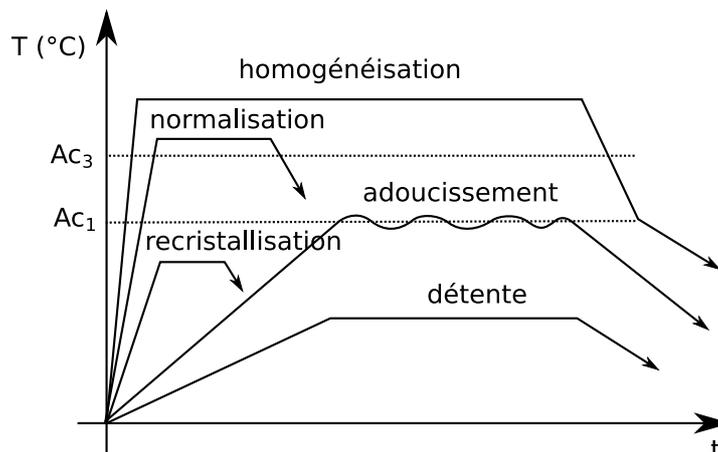
2.4 Situation

Règles à respecter :

- les pièces doivent être complètement refroidies avant le début pour être sûr que la transformation martensitique est terminée.
- le revenu suit immédiatement la trempe pour éviter la rupture des pièces qui peut se produire plusieurs heures, voire plusieurs jours après la trempe.

3 Recuit

Opération thermique qui annule les effets des traitements thermiques ou mécanique antérieurs.



Température $> AC_3$: homogénéisation, normalisation.
 Température $< AC_3$: adoucissement, recristallisation, détente.

But

- homogénéisation ou diffusion
- normalisation ou régénération
- adoucissement

¹eh oui il n'y a pas que le yoga dans la vie

- détente ou stabilisation
- suppression de l'effet de l'érouissage

3.1 Recuit d'homogénéisation

Il se pratique après moulage ou corroyage, à haute température ($950 \rightarrow 1200 \text{ }^\circ\text{C}$). La vitesse de refroidissement ne doit pas être trop élevée : de 20 à 60 $^\circ\text{C}$ par heure.

3.2 Recuit de normalisation

On l'applique après un maintien à haute température (moulage, forgeage, homogénéisation) pour augmenter la grosseur du grain. Normalisation : affinage du grain pour obtenir un état structural de référence (avant la trempe par exemple).

La finesse du grain est proportionnelle à la vitesse de chauffe. La température de traitement est d'environ $AC_3 + 50^\circ\text{C}$. Le refroidissement $AC_3 \rightarrow AC_1$ est rapide (pas trop sinon c'est trop dur), puis le refroidissement s'effectue à l'air.

3.3 Recuit d'adoucissement ou de globulisation

Permet d'obtenir une structure correspondant à la dureté minimale de l'acier pour faciliter la mise en forme à froid ou l'usinage par outils coupants.

Après traitement, on obtient une structure de perlite globulaire dans une matrice ferritique. Pour affiner le grain, on peut faire un recuit de normalisation avant l'adoucissement.

| | Hypoeutectoides (% C < 0.80) | Hypereutectoides (% C > 0.80) |
|-----------------|--|--|
| chauffage | $AC_3 + 30^\circ\text{C}$ | $\approx AC_1$ ou $> AC_3$ pour homogénéiser la structure |
| refroidissement | 20 $^\circ\text{C}/\text{h}$ jusqu'à 600 $^\circ\text{C}$ puis à l'air | jusqu'à $T \leq AC_1$ (700 $^\circ\text{C}$), maintien pendant $\approx 10\text{h}$ |

3.4 Recuit de détente (ou stabilisation ou relaxation)

Il vise à éliminer les contraintes internes produites par la mise en forme, la solidification, le soudage ou l'usinage. On chauffe la pièce jusqu'à une température comprise entre 600 et 650 $^\circ\text{C}$, puis on refroidit lentement.

3.5 Recuit de recristallisation

Il s'effectue après une déformation à froid (emboutissage, extrusion, étirage à froid, ...) qui provoque toujours un érouissage et l'augmentation de certaines caractéristiques mécaniques (σ_e , dureté, ...). Ce traitement permet une restructuration des caractéristiques initiales du matériau. Température de recristallisation : elle dépend du taux d'érouissage de la pièce. Par exemple : 75% $\rightarrow 300^\circ\text{C}$, 5% $\rightarrow 700^\circ\text{C}$ pour des aciers non alliés.

3.6 Recuit de grossissement du grain

C'est un traitement qui se fait au dessus de la température critique pour le grossissement du grain avec un refroidissement lent. La structure confère au matériau une faible ténacité, ce qui est indésirable en général, mais on obtient une amélioration de l'usinabilité. On usine donc puis on fait un recuit de normalisation pour affiner le grain.

3.7 Recuit magnétique

Il est appliqué aux pièces en fer pur utilisées dans les appareil électromagnétiques. Il redonne au fer ses propriétés magnétiques qu'il perd à la suite de déformations plastiques qu'il a pu subir.

Les recuits se situent en général après la mise en forme (forgeage, moulage, soudage), et quelques fois après l'ébauche (recuit de détente).

II - Traitements surfaciques

4 Choix du traitement - But

| Traitement | Propriété améliorée |
|------------------------------|---|
| nituration | résistance au frottement (grippage, fatigue, corrosion) |
| cémentation (ou carburation) | résistance à la fatigue, fatigue de contact sous charge modérée |
| carbonituration | frottement, fatigue, fatigue de contact sous charge modérée |
| trempe superficielle | |

But : modification des couches superficielles de la pièce pour leur donner des propriétés particulières. Dans tous les cas, le coeur est très tenace (résistant aux chocs), la surface a une dureté élevée (résistance à l'usure).

Influence des paramètres sur la profondeur traitée :

- temps de traitement
- température
- composition de l'acier de base
- présence ou non de plusieurs agents diffusants (carbone, azote)

5 Cémentation

Définition : enrichissement de la couche superficielle de la pièce par le carbone pour obtenir une bonne résistance à l'usure et à la fatigue sous fortes charges. Profondeur cémentée : $\approx 1\text{mm}$. La cémentation se fait en trois phases :

- réaction chimique à haute température avec fixation du carbone sur l'acier
- diffusion du carbone dans les couches superficielles
- traitement thermique de l'acier lorsque l'épaisseur enrichie est suffisante pour durcir la couche cémentée.

Il existe trois types de cémentation : cémentation gazeuse, liquide, solide.

5.1 Cémentation gazeuse

En général, le gaz utilisé est du monoxyde de carbone ou du méthane. Le carbone est libéré par réaction dans l'austénite. Il faut définir :

- l'atmosphère gazeuse
- la température de cémentation
- le temps de cémentation

5.2 Cémentation liquide

Le bain de cémentation est composé d'un mélange de cyanure de sodium, de chlorures alcalinoterreux (baryum...), de chlorures alcalins (sodium, potassium) et de graphite pour isoler la surface du bain. La réaction de cémentation prépondérante est : $2CN^- \rightarrow NCN^{--} + C$. Paramètres : composition du bain, température et durée.

5.3 Cémentation solide

On utilise comme ciments du carbone amorphe (charbon de bois) qui brûle et dégage du CO_2 . Le problème est que les couches obtenues sont irrégulières. On mélange donc avec la poudre de charbon de bois entre 25 et 40 % de carbonate de baryum.

5.4 Critère de choix du procédé

Solide : pour un traitement unitaire ou en petite série. Cela ne nécessite pas d'installation particulière mais des manipulations importantes.

Liquide : pour des pièces peu importantes et les moyennes séries. Les problèmes les plus importants viennent de la toxicité des bain (le cyanure ça défonce).

Gazeuse : c'est le procédé le plus courant qui permet le meilleur contrôle des paramètres de cémentation.

Remarque : On peut ne cémenter que certaines parties des pièces en empêchant la diffusion de carbone par recouvrement par de pâtes de cuivre ou en les cuivrant par électrolyse.

5.5 Traitements thermiques associés

* Recuit avant cémentation : cela donne une bonne stabilité dimensionnelle, avec une régénération du grain avant cémentation.

* Trempe des pièces cémentées :

- Trempe directe : trempe à partir de la température de cémentation.
- Trempe simple : refroidissement après cémentation, puis réchauffage dans une atmosphère neutre. Utilisée pour faire des reprises d'usinage après cémentation.
- Trempe double : 2 chauffages après cémentation. Cause de fortes déformations des pièces.
- Traitement par le froid : pour transformer l'austénite résiduelle. On refroidit entre -60 et -180°C pour augmenter la dureté. La résistance à la fatigue et les autres propriétés baissent.

* Revenu après trempe des pièces cémentées : revenu à basse température (160 à 180°C) pour réduire les tensions internes sans faire chuter la dureté.

5.6 Aciers de cémentation

* L'élévation de la dureté de la résistance des couches superficielles provoque une fragilité qui doit être compensée par un cœur ductile, donc $\% C < 0.3$.

* Risque de grossissement du grain austénitique qui peut rendre l'acier plus fragile, on pourra faire un calmage à l'aluminium.

* Pour des pièces modérément sollicitées en surface, on prendra des aciers à faible $\%C$. On augmente la teneur en carbone pour des pièces fortement sollicitées (dentures d'engrenage par exemple).

5.7 Situation

On fait en général une trempe après cémentation pour avoir une bonne résistance à l'usure et une bonne dureté. La cémentation se situe après l'ébauche ou la demi-finition.

6 Nitruration

6.1 Buts

Principe : diffusion de l'azote atomique dans le fer α en phase liquide ou gazeuse. Les effets obtenus sont :

- augmentation de la dureté en surface
- augmentation de la résistance à l'usure
- augmentation de la limite de fatigue
- augmentation de la résistance à la corrosion

La température de nitruration (500°C) implique des déformations plus faibles que pour la cémentation.

6.2 Mécanisme de la nitruration

Suivant la proportion d'azote diffusé, les couches superficielles pourront avoir diverses structures :

- Couche de diffusion : dureté élevée ($400 \rightarrow 900$ HV), améliore le coefficient de frottement et la résistance à la fatigue. Épaisseur : quelques dixièmes de mm.
- Couche de combinaison monophasée : dureté jusqu'à 1300 HV, améliore le coefficient de frottement et la résistance à l'usure. Épaisseur : quelques dizaines de μm .
- Couche de combinaison biphasée : dureté jusqu'à 1500 HV, faible ductilité et grande fragilité.

6.3 Paramètres

La profondeur et les qualités de la couche nitrurée dépendent :

- du temps de traitement
- de la température de traitement
- du type d'acier
- des méthodes de nitruration
- du mode de nitruration

La profondeur nitrurée augmente avec la température mais si celle-ci est trop élevée, on a une chute de la dureté superficielle. En général, on prendra 500°C.

Modes de nitruration : gazeuse, liquide, ionique.

6.4 Nitruration gazeuse

L'azote est apporté par dissociation partielle de l'ammoniac : $NH_3 = N + 3H$.

6.5 Nitruration liquide

Le bain est composé de sels fondus à base de cyanure de sodium et de potassium à une température comprise entre 500 et 750°C.

6.6 Nitruration ionique

Les pièces sont placées dans un réacteur contenant le mélange gazeux (azote, hydrogène et un hydrocarbure) à une pression comprise entre 66 et 2000 Pascals. On applique une différence de potentiel (400 → 1000 V) entre la pièce et la paroi du réacteur. Ce procédé permet de nitrurer n'importe quelle nuance d'acier.

6.7 Situation

En général, l'ordre est le suivant : trempe, revenu, usinage, puis enfin nitruration (en dernière phase). La température de revenu doit être supérieure de 30 à 50% de celle de nitruration pour éviter les déformations.

Nitruration partielle : on peut protéger certaines surfaces à ne pas nitrurer par un étamage d'une épaisseur allant de 8 à 12 mm.

La nitruration est utilisée pour augmenter la résistance à la fatigue pour des températures inférieures à 500°C, ainsi que pour améliorer la résistance à l'usure et au grippage.

La nitruration ne convient pas si les surfaces subissent de fortes contraintes de cisaillement en sous-couche.

6.8 Aciers de nitruration

On prendra des aciers dont la teneur en carbone est comprise entre 0.25 et 0.40%. Si on rajoute de l'aluminium, on obtiendra des couches nitrurées de dureté très élevée (≥ 1000 HV). La température de nitruration varie de 500 à 570°C pour éviter la fragilisation à haute température. Une couche nitrurée de bonne qualité possède une structure fine et homogène.

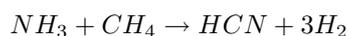
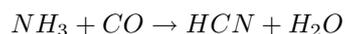
7 Carbonitruration

C'est une cémentation à la fois par du carbone et par de l'azote. Il en existe 2 types :

- carbonitruration en phase austénitique
- carbonitruration en phase α

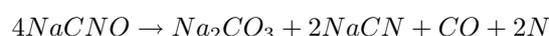
7.1 Carbonitruration en phase austénitique

* **En phase gazeuse** : on utilise un gaz contenant de l'ammoniac et de l'oxyde de carbone ou du méthane.



HCN (acide cyanhydrique) réagit avec le carbone et fixe l'azote. La solubilité de carbone dans l'austénite augmente avec la température mais la teneur en azote de la couche diminue. On prendra une température comprise entre 820 et 850°C.

* **En phase liquide (cyanurisation)** : la solution contient 20% de cyanure, 30% de carbonate et 50% de chlorure de sodium.



La teneur en carbone et en azote de la couche est fonction de la température. Suivant la profondeur souhaitée, on prendra une température entre 800 et 855°C.

7.2 Carbonitruration en phase α

La solubilité de l'azote est plus grande dans le fer α , elle est maximale pour $T = 590^\circ\text{C}$. On prendra une température entre 600 et 700°C en phase gazeuse. On obtient des couches durcies sans déformation mais d'épaisseur très faible : de l'ordre du dixième de mm pour 24 heures de traitement à 700°C .

7.3 Propriétés

À profondeur de traitement identique, les propriétés en fatigue et fatigue de contact pour la carbonitruration en phase austénitique sont meilleures que pour la cémentation. Les aciers de carbonitruration sont plus chargés en carbone donc les couches carbonitrurées sont moins résistantes aux chocs, les pressions superficielles admissibles sont plus faibles.

7.4 Situation

* Carbonitruration en phase austénitique : on peut faire une bonne trempe à partir de la température de carbonitruration, dans un bain d'huile entre 80 et 160°C , sans revenu.

* Carbonitruration en phase α : elle ne provoque pas de déformation, on peut la placer près l'usinage. On obtient une dureté allant de 700 à 1100HV , il n'y a donc pas besoin de trempe.