

Traitements thermiques

Trempe et Revenu

1. Trempe

La trempe est utilisée pour améliorer les qualités d'emploi de l'acier en lui donnant une meilleure ténacité.

Le cycle thermique comporte trois phases successives :

- Chauffage à une température de trempe correspondant à un état austénitique. La durée de mise en température est suffisamment prolongée pour que l'homogénéité soit réalisée jusqu'au cœur de la pièce.
- Maintien à cette température de façon à réaliser la mise en solution des carbures dans le fer γ et l'homogénéisation de l'austénite (austénisation).
- Refroidissement rapide avec une vitesse supérieure à la vitesse critique de la trempe (pour les aciers au carbone le plus souvent dans l'eau et pour les aciers alliés dans l'huile ou dans un bain de trempe d'autre nature).

Le but du refroidissement rapide est d'obtenir une structure martensitique, donc éviter une transformation perlitique. La transformation de l'austénite doit commencer et se terminer dans le domaine de la martensite.

Donc la trempe permet de donner un maximum de dureté à l'acier $HV = 700 \text{ à } 800 \text{ Kp/mm}^2$ ou $HRC = 60 \text{ à } 65$, ce qui donne une structure convenable pour le traitement de revenu.

La trempe n'est pas un traitement thermique définitif, le plus souvent elle est suivie d'un revenu destiné à diminuer la fragilité et les contraintes internes afin de donner à l'acier les propriétés mécaniques appropriées.

1.1. Choix de la température d'austénisation

Les aciers hypoeutectoïdes doivent être chauffés de $30 \text{ à } 50^\circ\text{C}$ au-dessus de Ac_3 (fig.1). Un acier à structure initiale (perlite + ferrite) acquiert, au bout d'un maintien dont la durée dépend de la nuance de l'acier et de ses dimensions une structure austénitique qui se transforme en martensite lorsqu'on refroidit à une vitesse plus grande que la vitesse critique de la trempe.

Un acier hypoeutectoïde chauffé dans l'intervalle $Ac_1 \text{ à } Ac_3$, garde après la trempe, en plus de la martensite, des plages de ferrite. La présence de ferrite diminue la dureté de l'acier après trempe et ses propriétés mécaniques après revenu. Aussi ce mode de trempe incomplète ne s'emploie pas généralement pour les aciers hypoeutectoïdes.

Les aciers hypereutectoïdes sont portés à $Ac_1 + (50 \text{ à } 70^\circ\text{C})$, c'est la température à laquelle apparaît l'austénite, bien qu'une certaine quantité de cémentite secondaire reste encore (fig.1). Il en résulte

qu'après la trempe, la matrice martensitique compte des particules de cémentite non dissoutes lors du chauffage. Cette structure assure une dureté et une tenue à l'usure plus élevées.

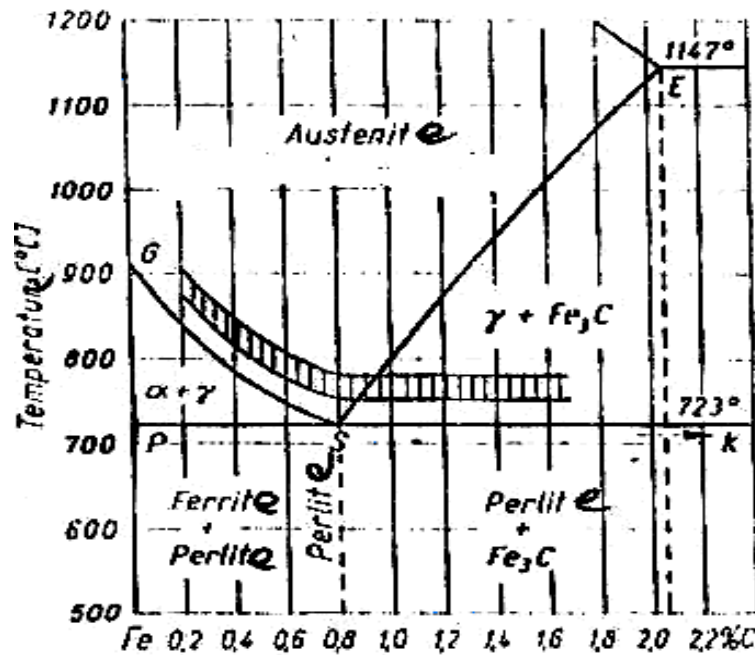


Fig.1. Choix de température d'austénitisation

La surchauffe durant la trempe produit une grande quantité du reste d'austénite et avec l'augmentation de la température la quantité d'austénite augmente effectivement, ce qui provoque une diminution de la dureté de l'acier (surtrempé).

1.2. Choix du temps de maintien

Le maintien de l'acier, à la température de trempe doit assurer le chauffage de la pièce jusqu'au cœur et l'achèvement des transformations de phases, sans être trop long pour ne pas provoquer le grossissement du grain et la décarburation des couches superficielles des pièces.

La durée totale de chauffage dépend donc de :

- t_{ec} : durée d'échauffement à cœur jusqu'à la température demandée. Elle dépend de la forme et des dimensions des pièces, de la nuance de l'acier, du type de four etc.
- t_{mi} : durée de maintien isotherme qui dépend de la composition et de l'état initial de l'acier.

$$t_{tot} = t_{ec} + t_{mi} \quad (1.1)$$

Dans la pratique pour déterminer t_{tot} , on se réfère aux données expérimentales, comme exemple on prend le tableau ci-dessous.

Moyen de chauffage	Durée en [s/mm] d'épaisseur de pièce		
	ronde	carrée	Rectangulaire
Four électrique	40 – 50	50 – 60	60 – 75
Four à flamme	35 – 40	45 – 50	55 – 60
Bain de sel	12 – 15	15 – 18	18 – 22
Bain de plomb	6 – 8	8 – 10	10 – 12

1.3. Choix de la vitesse de refroidissement pour la trempe

Pour estimer la vitesse de refroidissement, on utilise la relation entre la température et le temps : $T = f(\log t)$ représenté graphiquement (diagramme TTT). L'échelle logarithmique permet un étalement convenable des courbes de refroidissement rapide.

Le refroidissement doit se réaliser à une vitesse supérieure à la vitesse critique de trempe. Celle-ci étant la vitesse limite qui assure la transformation totale de l'austénite en martensite (fig.2) .

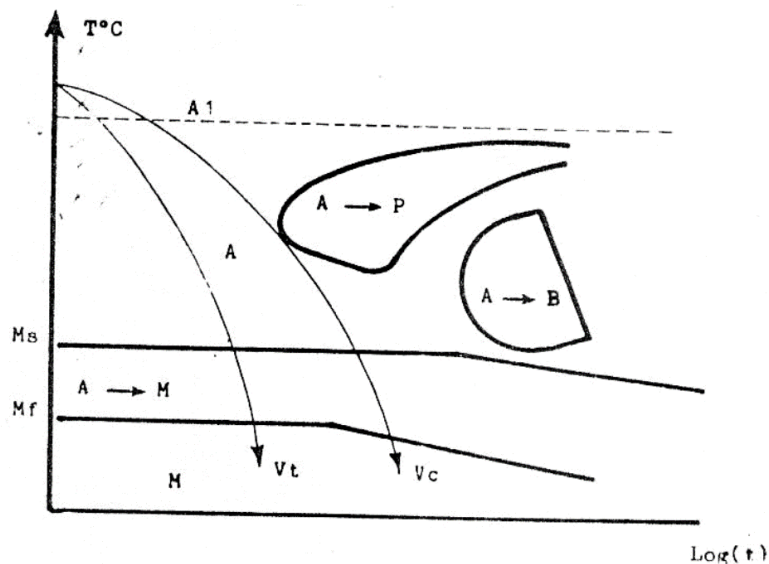


Fig.2. Courbes TTT de la transformation de l'austénite

Le tableau ci-dessous représente quelques vitesses de refroidissement selon la nature du bain de trempe :

Nature du bain	Vitesse de refroidissement
Saumure	220 °C / seconde
Eau froide	160 °C / seconde
Eau tiède	150 °C / seconde
Eau chaude	140 °C / seconde
Huile de trempe	70 °C / seconde
Air soufflé	20 °C / seconde
Air calme	2 °C / seconde
Dans un moule de sable	0,05 °C / seconde
Dans le four	0,01 °C / seconde (ou selon la programmation du cycle)

1.4.Choix du milieu de trempe

Le milieu de trempe doit assurer le refroidissement dans toute la section des pièces, et l'obtention d'une structure martensitique sans produire de défauts tels que : tapures, déformations, gauchissement, contraintes résiduelles etc.

Le meilleur refroidissement est celui qui se fait à grande vitesse dans l'intervalle de température A_1 – M_s . Ceci permet d'étouffer la décomposition de l'austénite surfusionnée dans le domaine des transformations : perlitique et intermédiaire. Ce refroidissement est ralenti vers les basses températures dans le domaine de la transformation martensitique M_s – M_f .

Une grande vitesse de refroidissement dans l'intervalle martensitique est indésirable car elle accroît les contraintes résiduelles et produit des tapures.

Généralement, on utilise pour les bains de trempe, des liquides qui peuvent bouillir tels que l'eau, les solutions aqueuses de sels et d'alcalins, les huiles. La trempe par ces agents passe par une étape de refroidissement pelliculaire (ou caléfaction) où une gaine de vapeur protège les pièces et empêche le refroidissement. Une fois que l'agent refroidissant se met en ébullition, la gaine se rompt et l'évacuation de la chaleur s'accélère.

Pour les aciers au carbone, on utilise le plus souvent de l'eau comme milieu de trempe, alors que pour les aciers alliés, on utilise soit de l'huile, soit un bain de sel.

1.5. Les différents types de trempe

Le procédé le plus utilisé est celui de la trempe dans un milieu refroidissant unique ou trempe continue. Mais on utilise également d'autres modes de trempes dans les cas où la forme des pièces est complexe où il faut diminuer les déformations.

1.5.1. Trempe à deux bains :

On refroidit d'abord à l'eau jusqu'à 300 ou 400°C (un peu au-dessus de M_s), ensuite rapidement on place la pièce dans un milieu à sévérité de trempe plus faible, par exemple l'huile ou l'air où elle se refroidit jusqu'à la température ambiante. Le transfert de la pièce dans un agent refroidisseur différent affaiblit les contraintes internes qui apparaissent avec le refroidissement rapide dans un seul agent refroidisseur.

1.5.2. Trempe suivie d'auto-revenu :

Ce mode est destiné à obtenir une dureté plus faible au cœur de la pièce qu'à sa surface. Dans ce cas, le refroidissement de la pièce dans un bain de trempe est interrompu lorsqu'elle garde encore quelque chaleur à l'intérieur.

En se dégageant, cette chaleur élève la température des couches superficielles plus refroidies et produit ainsi l'autorevenu. Lorsque la température atteint la valeur requise, la pièce est de nouveau plongée dans le bain de trempe. Ce mode de trempe est très employé pour les pièces qui supportent

des charges dynamiques et qui doivent combiner une dureté superficielle élevée à ductilité accrue au cœur, telles que burins, massettes, marteaux d'ajusteur, pointeaux.

1.5.3. Trempe isotherme (étagée) martensitique :

La pièce prévue pour être trempée par ce procédé est chauffée jusqu'à la température de trempe, puis refroidie dans un bain dont la température est légèrement supérieure au point M_s (fig.3), généralement de l'ordre de 180 à 250°C, et maintenue à cette température un temps relativement court. Ensuite la pièce est refroidie à l'air jusqu'à l'ambiante. Le maintien dans le bain de trempe assure le nivellement de la température suivant toute la section de la pièce sans provoquer la décomposition de l'austénite avec formation de la bainite.

La transformation martensitique assurée par un refroidissement à l'air est moins complète que celle produite par la trempe continue. L'acier garde donc un peu plus d'austénite résiduelle.

La trempe martensitique diminue :

- Les modifications volumiques produites par la présence d'une grande quantité d'austénite résiduelle et la propension de la martensite à l'autorevenu.
- Le gauchissement, car la transformation martensitique se produit presque simultanément dans toutes les sections de la pièce.
- Le danger de la formation des tapures.

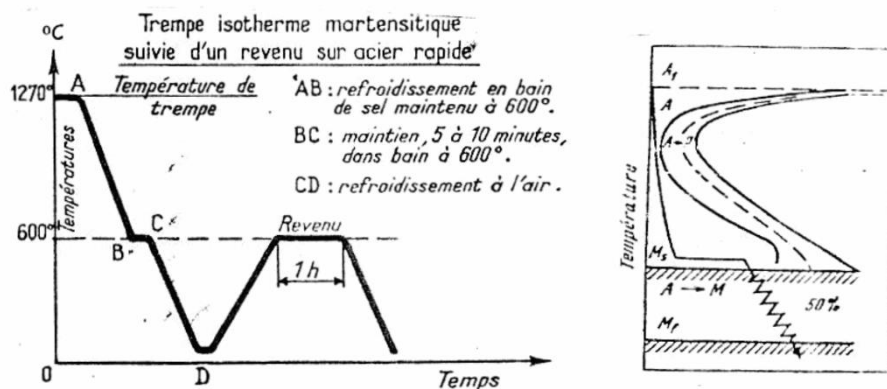


Fig.3. Cycle thermique de la trempe martensitique

1.5.4. La tempe isotherme (étagée) bainitique

Ce type de trempe, (fig. 4), s'effectue en principe, de la même façon que la trempe martensitique, mais elle impose un séjour plus long au-dessus du point M_s . Un tel séjour assure la décomposition de l'austénite avec la formation de bainite inférieure. La trempe bainitique des aciers au carbone n'améliore pas sensiblement les caractéristiques mécaniques par rapport à celles obtenues par trempe usuelle et revenu.

Dans la majorité des aciers alliés, l'austénite ne se décompose pas complètement dans le domaine bainitique. Si l'austénite qui ne s'est pas décomposée lors du maintien isotherme ne subit pas de

transformation martensitique pendant le refroidissement ultérieur, l'acier reçoit une structure constituée de bainite et de 10 à 20 % d'austénite résiduelle (enrichie en carbone). Une telle structure assure une résistance très élevée et une ductilité suffisante.

Pour de nombreux aciers, la trempe bainitique augmente nettement la résistance fonctionnelle, c'est à dire, la résistance des éprouvettes de forme complexe.

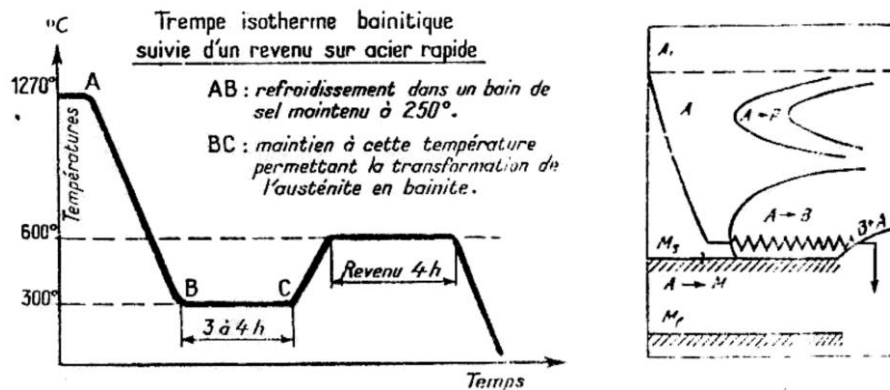


Fig.4. Cycle thermique de la trempe bainitique

2. Trempabilité et pénétration

La trempabilité d'un acier est son aptitude à accroître sa dureté sous l'effet de la trempe. Elle est liée directement à la pénétration de trempe. Celle-ci désigne l'aptitude de l'acier à recevoir une couche trempée plus ou moins profonde.

La trempabilité est définie essentiellement par la teneur de l'acier en carbone. Plus cette teneur, dans la martensite est élevée, plus sa dureté est grande. Les éléments d'alliages influent peu sur la trempabilité.

Sous le terme de pénétration de trempe, on comprend l'aptitude de l'acier à recevoir une couche trempée à structure martensitique ou troostite-martensite et une dureté élevée d'une profondeur plus ou moins grande. La pénétration de trempe est déterminée par la vitesse critique de refroidissement.

2.1.Essai Jominy

Il a pour but d'obtenir, en une seule opération sur une éprouvette normalisée, des indications globales sur la trempabilité d'un acier, sous forme d'une courbe appelée courbe Jominy. (Fig.5) Cet essai est réalisé en trois étapes.

- L'austénitisation d'une éprouvette normalisée prélevée dans l'acier à tester.
- Le refroidissement en bout par un jet d'eau dans des conditions imposées.
- La mesure de dureté sur un méplat le long d'une génératrice et dont l'usinage ne doit pas provoquer un échauffement excessif. Les points de mesure de la dureté sont situés à : 1,5 - 3

- 5 - 7 - 9 - 11 - 13 - 15 - 20 - 30 - 40 - 50 - 60 - 70 - 80 mm de l'extrémité arrosée et sont désignés par J1,5 - J3 - J5 - ...Jx ...

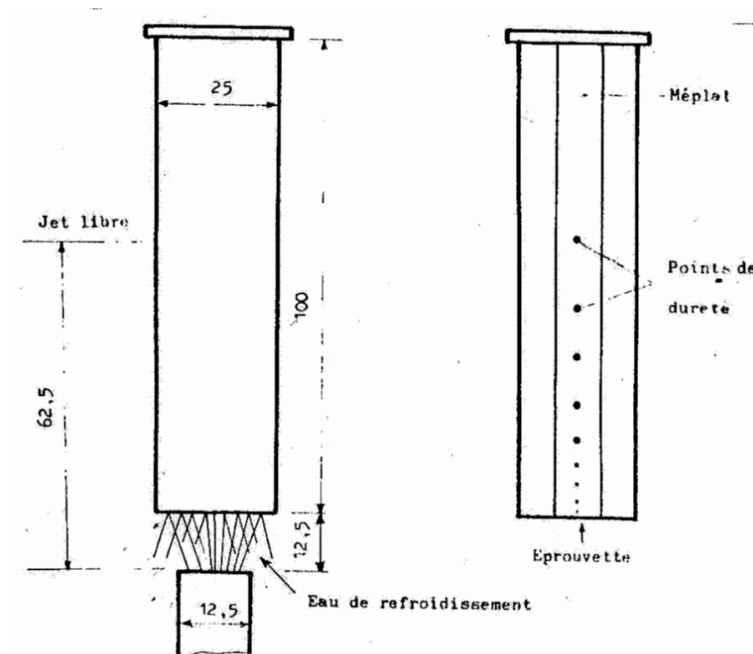


Fig.5. Essai Jominy

La courbe de la dureté H (HRC, HV) en fonction de la distance Jx (mm) entre la base refroidie et le point de relèvement de la mesure de dureté qui portera le nom de courbe Jominy permet de déterminer la trempabilité de l'acier (Fi.6).

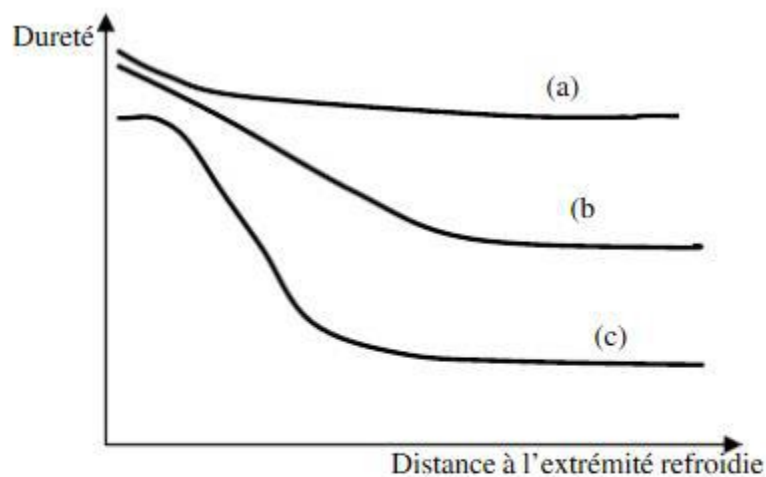


Fig.6. Courbe Jominy d'aciers.

(a). acier à bonne trempabilité, (b). acier à moyenne trempabilité, (c). acier à mauvaise trempabilité

3. Le revenu

Le revenu est un traitement thermique pratique, généralement après trempe, et qui a pour but de corriger les défauts causés par la trempe d'un acier (contraintes internes et fragilités). Le chauffage

de l'acier trempé est effectué à une température inférieure à Ac_1 , (selon la résistance exigée), suivi d'un maintien à cette température et au refroidissement jusqu'à la température ambiante (fig. 7).

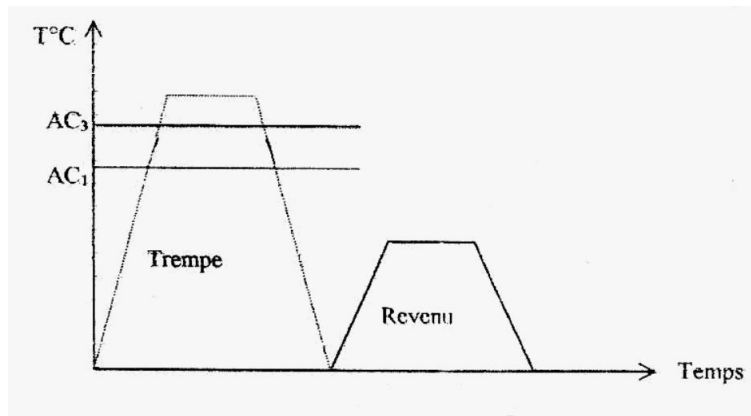


Fig.7. Cycle thermique de revenu

Le revenu est destiné à provoquer un retour plus ou moins marqué vers l'état stable à froid, donc d'obtenir les propriétés mécaniques requises, c'est à dire la martensite se transforme en de nouveaux constituants (sorbite, bainite).

Donc le revenu permet de supprimer les contraintes internes provoquées par la trempe, de diminuer la fragilité des pièces trempées tout en conservant une dureté suffisante. Cette suppression de contraintes est d'autant plus complète que la température du revenu est plus élevée, c'est à dire, l'affaiblissement des contraintes est le plus intense lorsque le maintien atteint 15 à 30 min à 550°C. La vitesse de refroidissement après revenu, a une influence faible sur l'état des contraintes résiduelles. Néanmoins plus le refroidissement est lent, plus les contraintes résiduelles sont faibles. Un refroidissement rapide dans l'eau à partir de 600°C produit des contraintes thermiques nouvelles.

3.1. Différents types de revenu

3.1.1. Revenu à basse température :

Le revenu à basse température s'effectue avec un chauffage vers 250°C et permet de diminuer les contraintes internes. Il transforme la martensite de trempe en martensite de revenu. Ce revenu augmente la résistance et améliore la ductilité sans altérer sensiblement la dureté (58 à 63 HRC), d'où une bonne tenue à l'usure. Il s'applique aux outils de coupe et aux instruments de mesure en aciers au carbone et faiblement alliés. La durée de ce revenu varie de 1 à 3 heures.

3.1.2. Revenu à température intermédiaire :

Le revenu à température intermédiaire se réalise entre 350 et 500°C et s'emploie pour les ressorts variés et les estampes. Il permet d'obtenir une limite élastique et une résistance à la fatigue élevées. La structure est de type troostite de revenu ou troostite - martensite dont les duretés varient de 40 à 50 HRC. Le refroidissement après revenu à 400 ou 450°C se fait à l'eau, ce qui contribue à la

formation en surface de contraintes de compression résiduelles qui élèvent la limite de fatigue des ressorts.

3.1.3. Revenu à haute température :

Le revenu à haute température se fait entre 500 et 680°C, il donne à l'acier la structure sorbite de revenu. Ce type de revenu crée un meilleur rapport entre la résistance et la ductilité de l'acier. La trempe suivie de revenu à haute température améliore, par rapport à l'état normalisé, ou recuit, les limites de rupture et d'élasticité, la striction et surtout la résilience. L'amélioration est appliquée surtout aux aciers de construction à moyen carbone (0,3 à 0,5%).