

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Ahmed ZABANA de Relizane



Faculté des sciences et technologies
Département de génie mécanique

Intitulé du cours en ligne:

Traitement thermique (T.T)

Destiné aux Etudiants du Master I

Domaine : Sciences et Technologie

Filière: Génie mécanique

Spécialité: Génie des Matériaux

Présenté par :

Le chargé de cours

Docteur HABIBI Samir

Maitre de conférences de classe -A-

Enseignant-Chercheur à l'université de Relizane

Année: 2021/2022

Sommaire

Partie 1. Concept de traitement thermique (Définition, Objectifs, Paramètres clés liés au T.T)

Partie 2. Propriétés des matériaux

Partie 3. Différents types de fours et les traitements associés

Partie 4. Défauts des pièces et mesures à prendre lors du traitement thermique

Partie 5. Classification des catégories des T.T

Partie 6. Traitement thermique dans la masse

- 6.1 Procédé thermique par la Trempe
- 6.2 Procédé thermique par le Recuit
- 6.3 Procédé thermique par le Revenu

Partie 7. Traitement thermique superficiel

- 7.1 Chauffage oxyacétylène (OA)
- 7.2 Chauffage par induction
- 7.3 Techniques haute énergie

Partie 8. Traitement thermochimique de diffusion

- 8.1 La cémentation
- 8.2 La nitruration,
- 8.3 La carbonitruration
- 8.4 La chromisation

Partie 9. Etude du diagramme temps-température- taux de transformation

Partie 10. Observations micrographiques et caractéristiques physiques et mécaniques

Partie 11. Analyse des trois types de traitement thermique appliqués aux aciers

Partie 12. Prédire et prévoir le comportement du matériau (acier) sous l'effet du T.T

Partie I. Concept de traitement thermique

Le traitement thermique est une application transverse avec de multiples procédés utilisés dans des industries variées comme l'automobile, l'aéronautique, l'industrie mécanique ou la fabrication métallique. Avec le développement de nouveaux matériaux et l'exigence croissante des utilisateurs finaux pour l'amélioration des propriétés mécaniques, de nouvelles applications de traitement thermique se développent rapidement comme la cémentation à basse pression et la trempe au gaz ou la nitruration. Pour assurer un processus fiable et efficace, la sécurité et la reproductibilité sont essentielles.

Un traitement thermique est un processus complexe et des opérations successives au cours desquels un produit solide ferreux, ou un matériau est modifié. En effet, il s'agit de changer la structure ou les propriétés de ce matériau grâce à divers cycles thermiques.

Les pièces finies ont besoin des traitements thermiques essentiellement pour améliorer les propriétés des matériaux. Ces traitements visent à corriger les caractéristiques à cœur des métaux (éliminer des contraintes internes, modifier la limite élastique, résistance à la flexion, fatigue, énergie à la rupture et comportement au fluage avec le temps d'opération) ou les finitions superficielles (augmenter la dureté, la résistance à la corrosion ou à l'usure et au frottement, prévenir l'apparition de fissures).

En fonction du métal de base, il est aussi possible d'améliorer les propriétés des matériaux dans des atmosphères neutres, sans ajouter d'éléments chimiques. Ainsi, pour des alliages ou des formes spécifiques, il est possible d'obtenir des pièces fines avec la structure métallurgique et les propriétés mécaniques requises pour un secteur industriel spécifique.

Les demi-produits ou les produits intermédiaires, comme les tubes, les tôles, les bobines d'acier, par exemple, sont produits à partir d'une matière première, et certains d'entre eux travaillés à froid dans les ateliers. Des propriétés mécaniques spécifiques et des caractéristiques données leurs sont nécessaires pour leur permettre d'être utilisées

en industrie, notamment : la ductilité (capacité à la déformation), et l'usinabilité (capacité à être travaillé). Pour cela, il faut leur appliquer un traitement thermique de recuit à haute température dans une atmosphère neutre. Pour certaines matières, comme les aciers inoxydables, le recuit est réalisé dans des atmosphères protectrices enrichies en hydrogène. Pour les aciers au carbone, on utilise des hydrocarbures pour empêcher leur décarburation.

La pièce métallique est introduite dans un four de traitement thermique où elle est chauffée, soumise et maintenue à une température élevée pour un temps défini et dans une atmosphère gazeuse spécifique qui peut être enrichie en carbone ou azote. Le traitement se conclut avec une phase de refroidissement contrôlée dite trempe.

Les principaux traitements thermiques sont :

- le recuit (pour les traitements thermiques à cœur),
- la trempe (à l'huile, aux polymères, en bain de sels fondus ou la trempe gaz à haute pression),
- les traitements de durcissement comme la nitruration,
- la cémentation (à pression atmosphérique ou à basse pression),
- les traitements mixtes comme carbonitruration ou nitrocarburation,
- le revenu et les traitements cryogéniques sous zéro pour les pièces utilisées dans le domaine de l'aérospatiale.

L'analyse du métal soumis au traitement thermique

Les éprouvettes permettent de mesurer en laboratoire les modifications des propriétés mécaniques du matériau traité. Les éprouvettes sont extraites des fours et permettent de tester les modules d'élasticité, la dureté, la résistance aux chocs, la résilience, pour s'assurer que la pièce convient aux cahiers des charges.

1.1 Définition

1.1.1 Définition générale

Le traitement thermique d'un matériau est un groupe de procédés industriels (une méthode, une technique utilisée pour la réalisation d'une tâche, ou la fabrication d'un matériau ou d'un produit fini) de nature mécanique ou chimique destiné à produire des objets ou à synthétiser des produits chimiques, en grande quantité et dans des conditions techniquement et économiquement acceptables et qui sont utilisés pour en modifier les propriétés physiques, mécaniques et parfois chimiques. De tels traitements sont utilisés lors de la fabrication des matériaux comme le verre, le bois, les aliments et surtout les métaux.

Le traitement thermique implique l'utilisation du chauffage et/ou du refroidissement, normalement à des températures extrêmes, pour obtenir le résultat souhaité, tel que la modification de la friabilité, de la dureté, de la ductilité, de la fragilité, de la plasticité, de l'élasticité ou de la résistance du matériau.

Les traitements thermiques jouent également un rôle important dans le domaine de la *tribologie* (la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire entre deux systèmes matériels en contact, immobiles ou animés de mouvements relatifs. Ce terme recouvre, entre autres, tous les domaines du frottement, de l'usure, de l'étude des interfaces et de la lubrification)¹.

1.1.2 Définition selon la norme NF EN 10052

La définition retenue par la norme NF EN 10052 pour traitement thermique est une succession d'opérations au cours desquelles un produit ferreux solide est soumis en totalité ou partiellement à des cycles thermiques pour obtenir un changement de ses propriétés et/ou de sa structure.

1.2 Objectifs des Traitements Thermiques

Un traitement thermique permet de modifier la structure cristalline du métal en lui faisant subir une augmentation de température dans un four et suivant un processus

parfaitement contrôlé. Il a des répercussions sur la dureté du matériau, mais aussi sur la ductilité (capacité à se déformer sans se rompre), une notion importante pour la production de ressorts.

Pour augmenter la dureté d'un alliage fer-carbone, il faut réaliser un chauffage supérieur à une température critique, évaluée entre 750 et 1 200 °C (variables possibles en fonction de la composition du métal). Un refroidissement rapide ou une trempe à une vitesse supérieure à la vitesse critique sera nécessaire pour finaliser le processus.

Le traitement thermique est un ensemble de procédés industriels qui consistent à modifier les propriétés physiques, mécaniques et/ou chimiques de matériaux, principalement des aciers et des alliages métalliques.

Les traitements thermiques sont réalisés dans un four où les pièces métalliques sont chauffées à haute température dans une atmosphère gazeuse contrôlée et choisie selon les propriétés que l'on souhaite modifier : dureté en surface, ductilité, résistance à l'usure, aspect esthétique etc. L'étape finale d'un cycle de traitement thermique est la trempe, qui est un refroidissement contrôlé des pièces pour les amener à la température ambiante. L'objectif est d'obtenir des pièces avec des caractéristiques mécaniques différentes des pièces initiales.

1.3 Les paramètres clés liés à la T.T

Un traitement thermique est tributaire de l'environnement et des conditions dans lesquelles se déroulement le transfert thermique.

Donc le T.T se joue sur plusieurs éléments tels que :

- la température fournie au matériau
- le temps de transfert thermique
- l'environnement pendant le maintien de la température.

Afin d'éviter les redites et les redondances les explications concernant ces concepts seront évoqués dans la rubrique relative au trois types de traitement thermique.

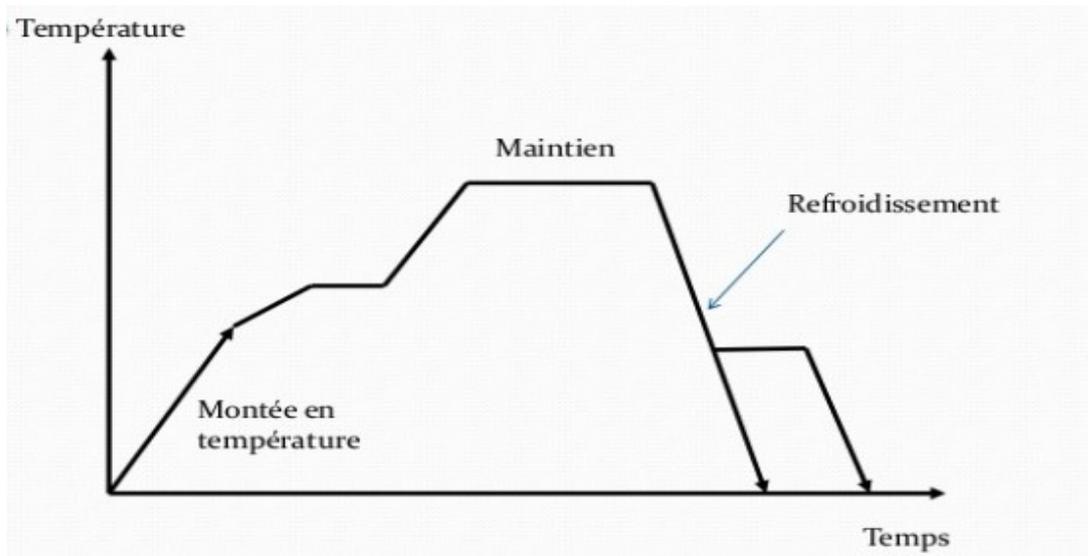


Fig. 1. Illustration de base des traitements thermiques.

En effet, il y a trois principales phases qui caractérisent le traitement thermique des matériaux métalliques. Il s'agit de :

1. la phase de chauffage, c'est-à-dire la montée en température,
2. la phase de stabilisation, c'est-à-dire le maintien de la température et homogénéisation du transfert thermique.
3. le refroidissement, s'effectue à l'aide d'un fluide de refroidissement (Voir Fig. 2) telles que :
 - L'eau pour avoir un refroidissement le plus rapide.
 - L'huile pour avoir un refroidissement à une vitesse moyenne.
 - L'air pour avoir un refroidissement le plus lent.



Fig. 2. Le système de refroidissement des pièces métalliques.

La régulation du milieu de refroidissement est un facteur prépondérant dans la mesure où il détermine le choix préalable du procédé thermique désigné (voir la partie consacrée à la classification des modes de traitement thermique).

Il faut souligner que le refroidissement (voir le figure ci-dessus) est la phase la plus critique et la plus importante. Il y a une certaine vitesse recherchée pour avoir des caractéristiques données. Pour cela, il faut faire le choix du milieu de refroidissement selon la trempabilité et les différentes dimensions du métal à traiter.

Partie 2. Propriétés des matériaux

2.1 Les propriétés

Les propriétés mécaniques des matériaux influencent leurs réactions face à une contrainte (cisaillement, étirement...) : par exemple, face à une même contrainte en compression, certains vont se déformer élastiquement, plastiquement ou se briser. Selon la fonction recherchée, le fabricant sélectionne le matériau le mieux adapté tout en prenant en compte le coût économique et les méthodes de mise en forme.

2.1.1 Les propriétés mécaniques

Tous les matériaux possèdent des propriétés mécaniques qu'un sous-traitant peut mesurer :

- La dureté soit la Résistance à la pénétration d'un autre matériau ;
- La rigidité soit la Capacité à garder sa forme initiale
- La ductilité soit la Capacité à s'étirer sans se rompre
- L'élasticité soit la Capacité à se déformer et à reprendre sa forme initiale
- La malléabilité soit la Capacité à s'aplatir et se courber sans se rompre
- La résilience soit la Résistance à la propagation de fissures (résistance au choc notamment)

La fatigue d'un matériau engendre, quant à elle, la modification des propriétés locales d'un matériau. Lorsque celui-ci est soumis à une succession de contraintes répétées dans le temps : par exemple, une pièce en rotation sous charge, les vagues sur les installations pétrolières etc.

2.1.2 Les autres propriétés

Au-delà des propriétés mécaniques d'un matériau, un fabricant peut également être amené à en préférer un plutôt qu'un autre, par la présence de ces propriétés, dont il pourrait avoir besoin :

- La résistance à la corrosion. Haute résistance à l'action d'autres substances comme la rouille (ex. la carrosserie automobile)
- La conductibilité électrique. Capacité à transmettre le courant électrique (ex. les lignes à haute tension)
- La conductibilité thermique. Capacité à transmettre la chaleur (ex. le chaudron)
- Le coefficient de dilatation thermique. Modification du volume du matériau en fonction de la température (ex. le liquide dans un thermomètre)

Partie 3. Différents types de fours et les traitements associés

Les constructeurs sont chargés de la conception, la fabrication et l'assemblage des fours. Le cycle thermique d'un four est adapté au traitement voulu (trempe, frittage, recuit, etc.) et il est souvent défini par le constructeur selon les besoins de l'utilisateur. Il existe différents types ou géométries de fours : en configuration verticale, horizontale, en cloche, et en tunnel.

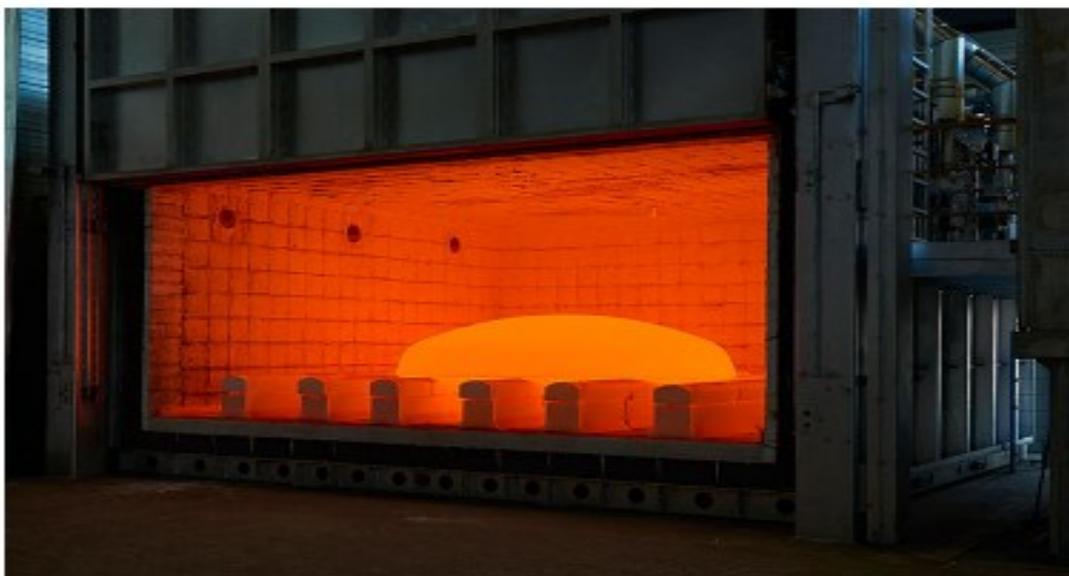


Fig. 3. Exemples de Fours de traitement thermique².

3.1 Les différents types de fours

Chaque type de traitement thermique industriel est réalisé dans un type de four spécifique, en fonction :

- du procédé,
- du type d'atmosphère (neutre, non décarburante, réactive enrichie en carbone ou en azote ou un mix des deux),
- des paramètres inhérents au traitement : vitesse de chauffe, température de maintien, type de chargement des pièces, etc.
- des différents types d'alliage et du gabarit des pièces à traiter (petites, grandes, pour des domaines industriels spécifiques, tels que l'aéronautique ou l'automobile),
- de l'uniformité des propriétés mécaniques requises pour la pièce finale (par exemple un four de cémentation atmosphérique peut conférer à la pièce finale une dureté moins homogène qu'un procédé de cémentation réalisé dans un four sous vide).

Comme règle générale, les traitements thermiques des métaux doivent toujours être faits à l'abri de l'air (source d'oxygène et d'humidité) pour éviter l'oxydation superficielle de l'acier à traiter.

Les constructeurs sont chargés de la conception, la fabrication et l'assemblage des fours. Le cycle thermique d'un four est adapté au traitement voulu (trempe, frittage, recuit, etc.) et il est souvent défini par le constructeur selon les besoins de l'utilisateur. Il existe différents types ou géométries de fours : en configuration verticale, horizontale, en cloche, et en tunnel.



Fig. 4. Présentation de four.

3.1.1 Les fours de recuit

Les fours de recuit sont des équipements d'une très grande capacité et s'ils sont correctement entretenus, ces types de fours sont très fiables et robustes. Leur maintenance régulière permet d'assurer la sécurité des opérateurs, mais aussi d'éviter tous risques de contamination de l'atmosphère du four.

3.1.2 Les fours de traitement de surface des métaux: Cémentation atmosphérique, nitruration, traitement mixtes C-N

Les fours de traitement de surface peuvent être de tailles variables, selon l'application et les dimensions des pièces à traiter. Ces types de fours mettent en œuvre plusieurs gaz tels que l'ammoniac, le méthanol ou l'acétylène et disposent d'un système de contrôle qui pilote les cycles d'injection de gaz de manière très précise.

3.1.3 Four à basse pression (BP) et de trempe à haute pression

Les matériaux pour l'aéronautique, le spatial ou l'automobile doivent supporter des charges et des conditions de fonctionnement de plus en plus critiques et nécessitent des traitements de surface de meilleure qualité (plus uniforme, plus homogène). Cela est possible grâce aux traitements thermiques de surface à basse pression ou sous vide. En effet, la basse pression facilite les échanges entre l'atmosphère réactive dans le four et la surface des pièces à traiter.

La trempe gaz à haute pression est un procédé sûr, propre et de haute qualité. En effet, la vitesse de refroidissement et les paramètres du cycle de trempe sont gérés de manière beaucoup plus précise que ceux d'un procédé traditionnel. Il n'y a pas de risques de caléfaction superficielle des pièces car il n'y a pas de contact entre la pièce et les liquides classiques de trempe (huiles, polymères ou sels fondu). De plus, les résultats obtenus ont une meilleure reproductibilité.

Grâce à ce procédé, les pièces finales présentent moins de déformations géométriques, sont plus propres et présentent des propriétés mécaniques plus uniformes par rapport aux pièces traitées avec les fluides classiques. L'utilisation du gaz permet aussi d'éliminer les contraintes liées à la gestion des huiles ou polymères usés et réduit l'impact environnemental du traitement.

Les fours de cémentation à basse pression (CBP) ou sous vide, les fours de nitruration à basse pression et de trempe gaz haute pression (HPGQ) sont généralement de taille moyenne ou petite. Ces équipements doivent résister à des pressions de travail allant du vide primaire (10⁻³mbar) jusqu'à 20 bars ou plus.

L'injection du gaz (ammoniac, acétylène, azote ou argon pour les pièces les plus critiques) doit respecter des plages de fonctionnement très strictes et exigeantes en termes de débit et de vitesse d'injection. La qualité du gaz (impuretés contrôlées) est aussi évidemment très importante pour la performance du processus.

Air Liquide vous fournit la meilleure solution en termes d'approvisionnement, de qualité de gaz et de réseau de distribution de gaz, et vous assure le bon fonctionnement de vos fours de traitement thermique. N'hésitez pas à contacter notre équipe d'experts pour en savoir plus sur les solutions gaz pour le traitement thermique.

Partie 4. Défauts des pièces métalliques présentent après un traitement thermique

Les traitements thermiques permettent d'améliorer les propriétés superficielles des pièces finies et de modifier leurs caractéristiques visuelles.

Les traitements thermiques réalisés sur les pièces finies (différents types d'acier, alliages métalliques de fer ou du cuivre) permettent d'améliorer leurs propriétés superficielles (la dureté, la résistance à la corrosion, à l'usure).

Dans certains cas, ils permettent aussi d'obtenir une modification des caractéristiques visuelles (coloration superficielle, brillance, etc.). Cela est particulièrement vrai lorsqu'on parle, par exemple, d'ustensiles de cuisine (couteaux, fourchettes, cuillères) dont l'aspect et la résistance à la corrosion ont une très grande importance aux yeux des consommateurs.

Pendant le traitement thermique, les pièces métalliques sont chauffées rapidement dans un four et maintenues à haute température dans une atmosphère chaude et réactive réalisée avec des gaz tels que de l'ammoniac, des hydrocarbures, et un gaz neutre tel que l'azote. Ensuite, les pièces subissent un refroidissement rapide et contrôlé dans des fluides appropriés (air, huile, polymères ou gaz selon le type de trempe appliqué). Si un des paramètres de travail n'est pas bien réglé, on peut obtenir une pièce défectueuse qui devient un rebut non utilisable.

4.1 Les défauts inhérents à un traitement thermique de surface

Après un traitement thermique réalisé dans des conditions non optimales, les matériaux traités et les pièces peuvent ne pas correspondre aux spécifications requises. Cela peut être un défaut visible, comme une coloration superficielle (vert, brun, avec des taches superficielles ou opaque). Parfois cela peut être aussi un défaut affectant les propriétés mécaniques de la pièce, comme par exemple :

- une variation trop importante de la dureté de surface d'un point à l'autre,
- une épaisseur de la couche modifiée non uniforme sur toute la pièce,

- des zones avec une composition chimique non souhaitée (décarburation superficielle et réduction de la teneur en carbone, épaisseur non uniforme de la couche de nitrure de fer).

Pourquoi les pièces peuvent-elles présenter des défauts ?

Au-delà d'une erreur dans l'application des bons paramètres du traitement thermique (ex. vitesse de trempe non suffisante, température trop basse, etc.), la contamination de l'atmosphère du four peut aussi générer des défauts sur les pièces finies. Cette contamination peut être causée par différents éléments :

- l'introduction dans le four de pièces métalliques sales (traces d'huiles ou de résidu de travaux précédents),
- l'utilisation de gaz (ammoniac, acétylène, azote pour la purge et la sécurité) pas suffisamment purs,
- des emballages contaminés,
- des fuites dans le système de distribution du gaz,
- un mauvais dimensionnement de l'installation pour les débits de gaz requis (ex. pour l'acétylène, il faut éviter le soutirage du solvant),
- ou tout simplement une dégradation du four : existence d'un trou ou d'une fuite qui permet à l'air et à la vapeur d'eau présents dans l'air de rentrer à l'intérieur du four, ou à l'atmosphère réactive de sortir du four. Ce dernier cas peut être très dangereux et présenter aussi des risques de sécurité pour les opérateurs.

4.2 Mesures à prendre lors de traitement thermique

Pour obtenir les propriétés recherchées avec le traitement thermique et pour assurer un résultat optimal, il est toujours conseillé de vérifier certains points avant de démarrer le travail.

Les cycles de traitement thermique sont composés de plusieurs étapes : cycle de chauffe, maintien en température puis refroidissement sous atmosphère contrôlée. Pour chaque matériau à traiter (aciers, alliages, inox, ..), les cycles sont adaptés en termes de durée, température, vitesse de refroidissement, etc.

4.3 Les bonnes pratiques avant de lancer le travail de traitement

Avant toutes opérations de traitement thermique, il faut s'assurer que les pièces à traiter sont correctement dégraissées et nettoyées pour éviter d'introduire dans le four des résidus solides ou liquides. Les impuretés risquent de polluer votre four, contaminer l'atmosphère et dégrader la qualité de votre traitement de surface. Quels que soient le type de traitement et le type d'installation, il faut toujours porter une attention particulière à l'état et au bon fonctionnement du four : étanchéité, parois internes, éventuelle fuite d'eau du water jacket, points d'injection du gaz, etc. Veillez à la qualité et pureté des gaz que vous utilisez pour générer l'atmosphère dans votre four. Un produit (azote, ammoniac, acétylène, etc.) qui n'est pas suffisamment pur ou qui ne respecte pas les critères de pureté, peut produire un résultat final non conforme à vos attentes, et voire même abîmer votre four. Pour terminer, veillez à la sécurité des opérateurs, au port des équipements de protection individuelle de sécurité appropriés et au strict respect des normes de sécurité dans l'atelier.

4.4 Mise en garde

A ne pas faire rentrer de l'air, de la vapeur d'eau ou de l'oxygène dans un four. En l'occurrence, associée à une atmosphère combustible, la présence d'oxygène peut se révéler dangereuse et déclencher une combustion, un incendie ou une explosion dans vos locaux.

4.4.1 Les analyses d'atmosphère pendant le traitement thermique

Vu la criticité de la composition de l'atmosphère dans le four, il est possible, pour certains traitements, d'analyser la présence de différentes espèces gazeuses (O_2 , H_2 , H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , ...), et cela peut être fait de deux manières :

1. le contrôle continu de l'atmosphère pour détecter tous risques de dérive. L'analyse est faite en continu pendant la phase de maintien en température.
2. l'analyse par échantillonnage, une analyse très répandue, qui permet aussi de vérifier les conditions du four quand une mesure continue n'est pas possible ou pas nécessaire.

Cette surveillance permet d'éviter des variations non maîtrisées des propriétés des pièces après traitement thermique (ex. fluctuation de la dureté, tâches superficielles, profondeur de pénétration du traitement non uniforme ou non conforme aux attentes, etc.).

Les experts Air Liquide sont à votre disposition. Ils peuvent se rendre sur place et vous accompagner dans vos choix et vos décisions concernant l'optimisation de votre traitement thermique.

En cas de dérive des résultats, ils peuvent réaliser des audits ponctuels ou récurrents de l'atmosphère de votre four, suivis par la rédaction d'un rapport détaillé qui vous aidera à résoudre les éventuels problèmes et à envisager des axes d'amélioration.

Classification des Traitements thermiques

Des méthodes qui respectent les exigences des propriétés physico-chimiques des matériaux métalliques pour leurs caractérisations éventuelles par procédés de traitements thermiques.

Trempe et revenu, trempe par induction, cémentation, carbonituration, nitruration... Afin d'augmenter la dureté du matériau choisi de manière superficielle ou à cœur, la proposition de méthode de préparation la plus appropriée est tributaire des propriétés physiques-chimiques et mécaniques escomptées des matériaux ciblés.

On distingue deux types de traitements, comme indiqué sur l'organigramme ci-dessous:

1. Traitement à cœur, comme le recuit : il se fait sur les pièces métalliques semi finies et déformées à froid (tôles, bobines d'acier ou tubes). Il vise à augmenter la ductilité du métal pour pouvoir le travailler.
2. Traitement thermiques : ils sont réalisés sur les pièces finies pour en changer les qualités et les propriétés mécaniques superficielles telles que la dureté, la résistance à la corrosion et à l'usure, etc.

Il existe aussi des traitements thermiques de durcissement réalisés à basse température avec de l'azote liquide dans des cellules cryogéniques où la température peut descendre jusqu'à -150°C . Ces traitements sont appliqués sur des pièces critiques pour l'aéronautique, le spatial et l'industrie de haute précision. Avant d'être intégrées dans des structures complexes comme un avion ou un satellite, les pièces doivent être traitées pour assurer la transformation de l'austénite résiduelle (phase plus souple) en martensite (phase plus dure). Cela a comme effet d'en augmenter la dureté et aussi d'éliminer les risques de variation dimensionnelle pendant leur utilisation (par exemple un avion qui passe régulièrement de la température au sol à la température à altitude de croisière).

Air Liquide a la solution adéquate pour tous les types de traitements thermiques. Nos experts sont à votre disposition et vous guideront pendant chaque nouvelle étape clé,

en fonction de votre application, du résultat recherché, du cycle thermique requis, et des éléments à traiter.

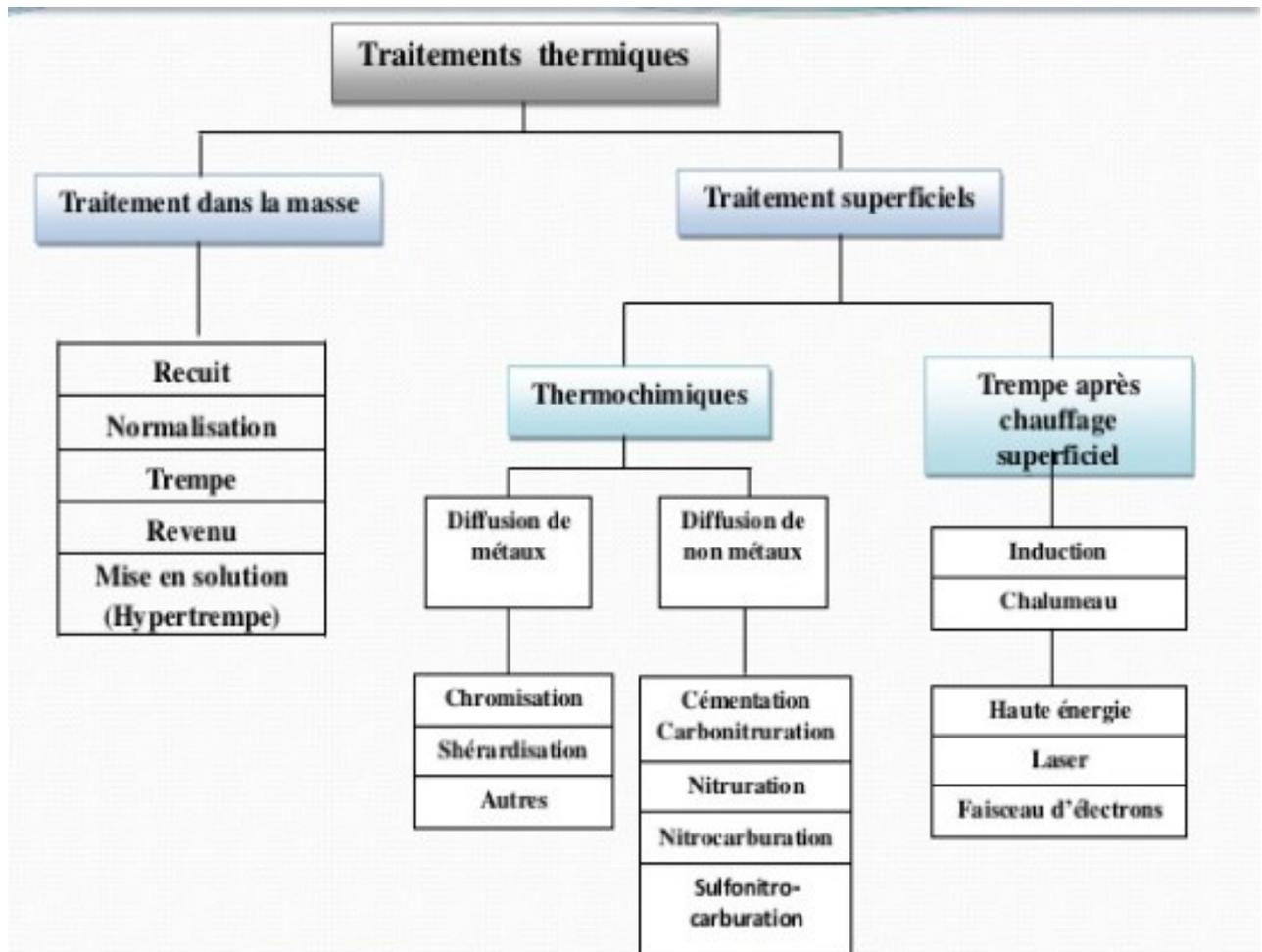


Fig. 5. Organigramme qui recense les Types de traitement thermique³.

Les principales techniques de cémentation suivie d'une trempe que nous mettons en œuvre sont la carbonituration ainsi que la boruration et les cémentations sous atmosphère & basse pression (LPC). Lorsque nous réalisons des traitements thermochimiques non suivi d'une trempe nous réalisons soit une nitrocarburation classique ou ferritique, soit une nitruration gazeuse ou ionique.

Le durcissement sous atmosphère protectrice, la trempe par induction, bainitique & sous presse sont des techniques de trempe et revenu que BRUVAL® réalise afin d'obtenir les propriétés mécaniques spécifiques d'un composant et d'éliminer les contraintes provoquées par la trempe.



Fig. 6. Pièce ayant subi les différents types de T.T. (four horizontal peut traiter des pièces atteignant 80 tonnes et 16000x6000x5000 mm. En fonction de l'opération à effectuer sur des structures en acier classique, allié ou inox, en cuivre et en laiton) ⁴.

La normalisation est pratiquée afin d'obtenir une structure à grains fins homogène et le recuit, pour réduire la dureté et éliminer les contraintes internes d'une pièce. Afin de minimiser les contraintes sans réduire la dureté, nous réalisons un recuit de détente (pratiqué avec un maintien à température d'environ deux heures et une vitesse de refroidissement lente).

Partie 6. Traitement thermique dans la masse

Le traitement thermique dans la masse d'un matériau est un traitement thermique qui affecte tout ce matériau et non uniquement sa zone superficielle comme c'est le cas d'un traitement thermique superficiel.

Les principaux traitements dans la masse en bref sont⁵:

Recuit :

Qui est caractérisé par l'évolution vers l'état d'équilibre le plus stable et un chauffage suivi d'un refroidissement lent.

Trempe:

Qui est caractérisé par l'évolution vers un état hors d'équilibre, instable ou métastable avec un Refroidissement rapide.

Revenu:

Qui est caractérisé par l'évolution à partir d'un état hors d'équilibre comportant des phases métastables, vers un état d'équilibre plus ou moins complet, accompagné d'un processus de chauffage lent suivi d'un refroidissement lent.

Le revenu succède généralement à une trempe et le stade ultime du revenu est l'état recuit.

6.1 Procédé thermique par la Trempe

La trempe est principalement un procédé de traitement des métaux et du verre à l'état solide.

La trempe peut être thermique (chauffage suivi d'un refroidissement rapide) ou chimique (immersion dans un bain de sel fondu), il peut aussi être dans la masse du matériau ou uniquement à sa surface :

La trempe désigne une opération qui consiste à refroidir brusquement un matériau porté à une température prédéfinie pendant suffisamment longtemps, en l'immergeant dans un liquide (huile, etc.) afin d'en améliorer ses propriétés.

La trempe est un traitement thermique qui comprend :

- Le chauffage du métal à une température supérieure au point de transformation.
- Le maintien isotherme pour permettre aux transformations internes de se produire dans toute la masse.
- Le refroidissement rapide a lieu par immersion des pièces dans un fluide.

6.1.1 Milieu de trempe

Trempe à l'eau tempérée soit une vitesse de refroidissement rapide.

Trempe à l'huile soit une vitesse moins grande (et moins de défauts).

6.1.2 Les défauts

Les déformations engendrées.

Les tapures dues à la dilatation de la transformation martensitique.

6.1.3 La modification des propriétés issue de la trempe

- La résistance à la rupture R_r tend vers la hausse.
- La contrainte à la limite élastique R_e tend vers la hausse.
- La dureté H_B tend vers la hausse.

- L'allongement A% tend vers la baisse.
- La résilience K tend vers la baisse.

Comme exemple on examine l'évolution des propriétés mécaniques étudiées $R_r, R_e, H_B, A\%, K$ suite à une opération de trempe appliquée sur deux aciers à savoir l'acier doux et l'acier demi-dur comme montré sur le tableau suivant :

Tableau I. La variabilité paramétrique issue d'opération de trempe classique.

Désignation	Etat	(Rr)e N/mm ²	(Re) N/mm ²	HB (N/mm ²)	A%	K (j/cm ²)
Acier doux 0.10 à 0.14% de C	-naturel	370	300	1080	38	340
	-trempé à l'eau	500	350	1460	32	320
Acier demi-dur 0.4 à 0.5% de C	-naturel	650	400	1900	18	120
	-trempé à l'eau	1900	1600	5600	2	10

6.1.4 Les types de trempe

6.1.4.1 Trempe de masse

La trempe est un traitement thermique qui donne à l'acier une grande dureté par transformation de l'austénite en martensite.

6.1.4.2 Trempe superficielle ou localisée

C'est obtenir une grande dureté en surface tout en conservant un bon allongement dans la zone sous-jacente jusqu'au centre de la section. Elle consiste à chauffer (ou par induction ou à la flamme) localement la surface d'une pièce en acier jusqu'à la température d'austénisation, à la refroidir ensuite à une vitesse suffisante. Le refroidissement s'effectue le plus souvent par jet d'eau sous pression.

6.2 Procédé thermique par le Recuit

Le recuit d'une pièce métallique ou d'un matériau est un procédé correspondant à un cycle de chauffage. Celui-ci consiste en une étape de montée graduelle en température suivie d'un refroidissement contrôlé. Cette procédure, courante en sciences des matériaux, permet de modifier les caractéristiques physiques du métal ou du matériau étudié. Cette action est particulièrement employée pour faciliter la relaxation des

contraintes pouvant s'accumuler au cœur de la matière, sous l'effet de contraintes mécaniques ou thermiques, intervenant dans les étapes de synthèse et de mise en forme des matériaux. À l'occasion d'un recuit, les grains (mono-cristaux) de matière se reforment et retrouvent en quelque sorte, leur « état d'équilibre ».

Le recuit est également utilisé pour changer les propriétés magnétiques d'une pièce.

Le recuit de cristallisation, après écrouissage, a pour but de conférer au métal une taille de grain optimale pour son utilisation future (pliage, emboutissage...).

6.2.1 Nécessité du recuit en métallurgie

Le laminage à froid d'un matériau provoque son écrouissage ce qui se traduit par une perte de ductilité (propriété d'un matériau à s'étirer sans se rompre) et un durcissement. Une restructuration de texture granulaire est alors nécessaire pour lui redonner les propriétés mécaniques sensiblement identiques à celles qu'il avait avant déformation.

6.2.2 Exemples d'utilisation du recuit

Adaptation de la taille des grains du métal pour des performances optimales (après une coulée) ;

Élimination de contraintes résiduelles (déformation plastique) ;

Baisse de la dureté en vue d'un usinage ;

Obtention de pièces mono-cristallines de caractéristiques exceptionnelles (ex: aubes de rotors de turbo-machines)...

6.2.3 Procédé

Le recuit est obtenu par élévation de température du métal à des températures allant de 500 °C à 850 °C. La qualité du recuit exige un cycle de chauffe (temps de montée en température, temps de maintien) bien maîtrisé (il peut être lent ou rapide).

Il est nécessaire de respecter certaines valeurs couplées de temps de maintien et de température de chauffe pour avoir une recristallisation complète.

La vitesse de chauffe influence la taille des grains (et leur nombre). En fonction de la structure d'origine et de la taille de grain souhaitée, il faudra être plus ou moins rapide. Le temps de maintien, la température de chauffe et la vitesse de refroidissement influencent plus encore la taille des grains.

Plus la descente est rapide (sans atteindre des vitesses de trempe), plus les grains restent petits.

Si une trempe est souhaitée, elle peut être réalisée en lieu et place du refroidissement du recuit.

6.2.3 Cycle lent et cycle rapide

Le cycle lent de recuit d'un acier est effectué en plaçant les bobines sous des cloches pendant 30 à 40 heures. Le recuit continu permet quant à lui un cycle de chauffage rapide (90 secondes + ou - 30 secondes). L'étape de refroidissement doit être aussi lente. Par exemple, les fours à cloche de type HICO/H2 utilisent à la fin du cycle de chauffage un refroidisseur qui commence par un refroidissement à air, jusqu'à une température de 300 °C, suivi par un arrosage à l'eau jusqu'à une température de 70 °C.

6.2.4 Intérêt du recuit continu

Apparu dans les années 1960, le recuit continu permet de réunir sur une ligne en continu les opérations de recuit, d'écrouissage, inspection, huilage, marquage, cisailage de rives et bobinage. Il permet un important gain de temps par rapport au recuit sous cloches (appelé aussi recuit de base).

6.2.5 Types de recuit

Il existe des nuances même de ces types de recuits, ce qui fait que l'on rencontrera d'autres dénominations. Ces quatre familles étant déterminées en fonction des bandes de températures qu'elles recouvrent sur le diagramme d'équilibre

6.2.5.1 Le recuit d'adoucissement: Ce recuit s'effectue soit sur des pièces trempées pour faciliter leur usinage (chauffage à $A1+80$) avec maintien 15 à 20 minutes, le refroidissement intervenant lentement à l'air (ou au four), c'est le recuit intégral, généralement, si poussé assez loin, ce recuit entraîne le retour à la structure d'origine.

6.2.5.2 Recuit de normalisation: Le recuit de normalisation a pour but d'obtenir un état de référence pour l'acier avec une structure à grains fins et des propriétés mécaniques aussi intéressante que possible pour les applications les plus courantes. Ce traitement consiste à réaliser les opérations suivantes :

- Chauffage à vitesse contrôlée mais la plus économique possible jusqu'à une température juste au début du domaine austénitique soit $AC3+50^\circ$ pour les aciers hypoeutectoides et $AcCm+50^\circ$ pour les aciers hypereutectoides.
- Maintien isotherme à cette température pendant une durée relativement courte fonction des dimensions de la pièce.
- Refroidissement en général à l'air calme. Ce type de recuit est utilisé principalement pour les aciers eutectoïdes et hypoeutectoïdes. Il consiste en un chauffage au-dessus de $A3$ suivi d'un refroidissement à vitesse bien définie.

Par cette opération, on élimine les hétérogénéités mécaniques et cristallographiques provenant des structures brutes de coulée très grossières ou éventuellement de laminage (Voir ci-dessous).

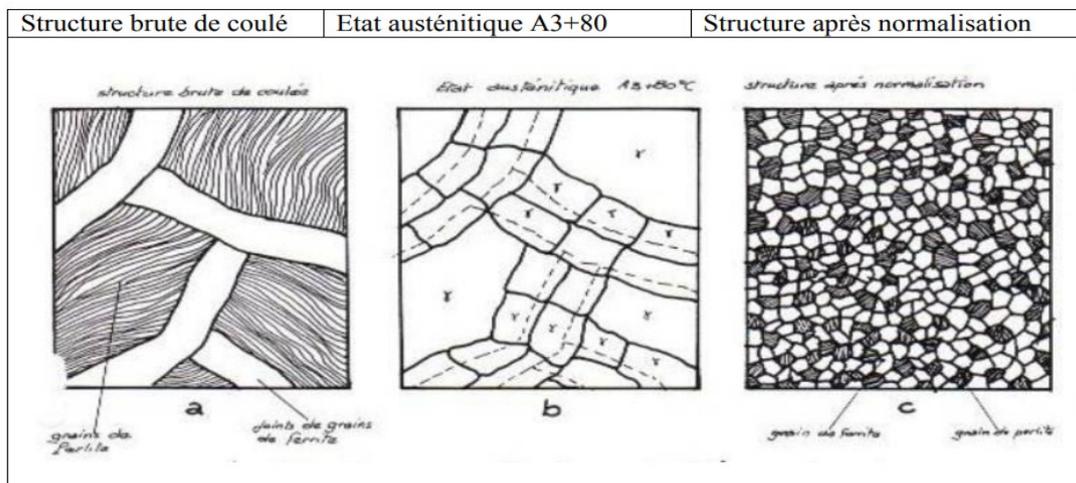


Fig. 7. Transformations de phases induites par T.T

Chaque transformation entraînant une recristallisation et un affinage du grain.

Les vitesses de chauffage et de refroidissement sont importantes, plus elles sont grandes, plus le grain est fin.

6.2.5.3 Le recuit de détente : on peut considérer le recuit de détente comme un revenu à hautes températures, en effet tous les traitements de ce groupe sont effectués

à des températures inférieures à A1. Ils ont surtout pour but de supprimer les contraintes internes provenant de la solidification des pièces du refroidissement, des déformations à froid, de la mécano-soudure, et également de certains traitements thermiques. Ces types de recuits ne sont pas uniquement destinés à l'acier mais aussi pour les fontes moulées en particulier.

6.2.5.4 Le recuit d'homogénéisation ou de diffusion: Le recuit d'homogénéisation est appliqué pour remédier à ce phénomène d'hétérogénéité. Il est caractérisé essentiellement par une diffusion accélérée des éléments dans la structure utilisant notamment une température élevée durant un temps prolongé. Il consiste en pratique aux opérations suivantes :

- Chauffage de la pièce avec une vitesse qui doit respecter l'état de l'acier (sa composition chimique, sa conductibilité thermique, sa forme et ses dimensions). La température du traitement doit être de son côté suffisamment élevée du domaine austénitique pour accélérer le processus de diffusion des éléments dans la structure de l'austénite. Elle est fixée à $(AC3 + 200^\circ)$ et $AcCm + 200^\circ$ respectivement pour les aciers hypoeutectoides et les aciers hypereutectoides.
- Maintien prolongé à cette température. Le temps est calculé à l'aide des lois de la diffusion selon la nature des éléments d'alliages et les dimensions de la pièce.
- Refroidissement à vitesse lente. A la suite de ce traitement, l'acier devient homogène mais surchauffé. Son état demande une régénération de la taille de ses grains.

6.3 Procédé thermique par le Revenu

Les traitements thermiques dits de revenu font partie d'une famille de traitements thermiques ayant pour trait commun d'être toujours effectués à des températures inférieures aux températures de transformations allotropiques des métaux, lorsque celles-ci existent.

Le revenu est un traitement thermique qui ne s'applique qu'aux métaux préalablement trempés. Le revenu a pour but de diminuer les effets de la trempe et d'atténuer les

tensions internes, en partie responsables de la fragilité du matériau trempé, en diminuant très peu la dureté.

Les revenus ont la particularité de produire deux effets :

-Une transformation métallurgique rendue possible par le mécanisme de diffusion amorcé pendant un séjour suffisant à température (voir Diagramme temps-température-transformation) ;

-Un abaissement de la limite d'élasticité et, de moindre façon, du module d'élasticité pendant la montée en température et une légère amorce de fluage pendant le temps de palier à température de revenu.

Selon l'état initial du matériau et sa composition chimique, l'un des effets prédomine aussi, selon ce qui est recherché, le revenu sera soit métallurgique, soit de dimensionnement. Cependant, quel que soit l'effet recherché, les deux effets se produiront et l'effet non recherché pourra avoir des conséquences non négligeables sur l'intégrité de la pièce traitée. Ceci est d'autant plus vrai si le traitement est effectué sur une construction soudée (effet de sur-revenu dans la zone thermiquement affectée des soudures par exemple).

D'une manière générale, pour tenir compte des deux effets produits, les traitements de revenu effectués sur les constructions soudées prennent le nom de traitement thermique après soudage (TTAS), en anglais Post Weld Heat Treatment (PWHT).

On recommande de :

Procéder à la qualification du mode opératoire de traitement thermique avant de procéder sur pièce réelle ;

Réaliser un témoin de fabrication pour vérifier le succès de l'opération et valider le mode opératoire de traitement thermique.

6.3.1 La modification des propriétés issue de la trempe

Le revenu tend à ramener la pièce en acier par exemple trempée vers un état d'équilibre en provoquant la précipitation des carbones initialement en solution dans

la martensite. La structure obtenue est la sorbite constituée de fines particules globulaires Fe_3C dispersées dans la ferrite. La sorbite possède une bonne résilience et de dureté HB 250 à 400.

- La résistance à la rupture R_r tend vers la baisse.
- La contrainte à la limite élastique R_e tend vers la baisse.
- La dureté H_B tend vers la baisse.
- L'allongement A% tend vers la hausse.
- La résilience K tend vers la hausse.

Le revenu provoque une évolution du matériau vers un état plus proche de l'état physicochimique d'équilibre sans toutefois rechercher à atteindre celui-ci. Le choix de TR et tR permet de contrôler ce retour plus ou moins complet vers l'état d'équilibre.

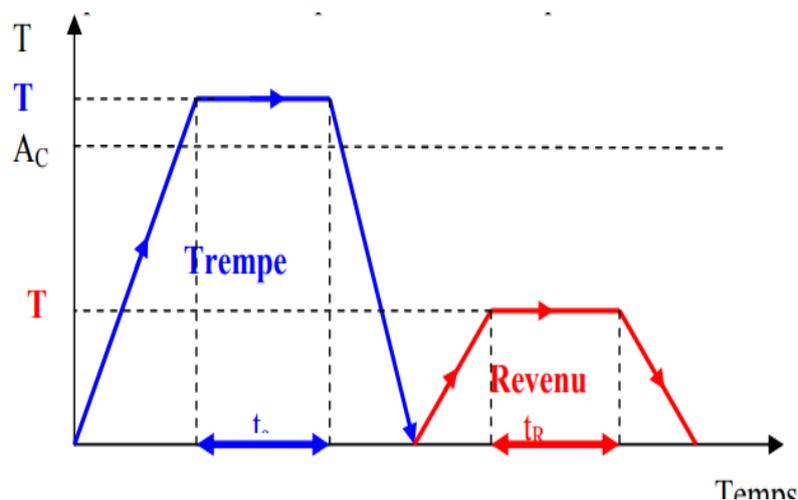


Fig. 8. Cycle complet (trempe, revenu)

6.3.2 Différents types de revenu

6.3.2.1 Revenu de relaxation ou de détente: Il s'effectue entre $180^{\circ}C$ et $220^{\circ}C$ - $250^{\circ}C$. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe et au changement de structure austénite \diamond martensite. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle...

6.3.2.2 Revenu de structure ou classique : Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et A_{cl}. On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H, R_m et Re. Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers.

6.3.2.3 Revenu de durcissement: Des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires).

6.3.3 Cas des aciers

Pour les pièces en acier trempé ou auto-trempant (c'est-à-dire pouvant prendre la trempe pendant le soudage - cas des aciers alliés au chrome par exemple), le revenu permet d'adoucir les effets de la trempe en produisant la martensite dite revenue sans trop altérer (choix judicieux de la température de revenu) les effets fondamentaux de la trempe.

Pour les aciers n'étant pas particulièrement résistants à chaud, il permet un détensionnement des contraintes par adaptation plastique (ainsi qu'un dégazage de l'hydrogène dissous lors du soudage par exemple), participe à la stabilisation dimensionnelle (certaines pièces de précision doivent parfois subir un détensionnement de contraintes avant un usinage) et améliore la résistance à la fissuration à froid.

Lorsque le TTAS est effectué pour agir sur l'état métallurgique du matériau (cas d'un acier allié au chrome, 15CrMo4 ou 12CrMo10 par exemple), les étapes clefs sont :

Chauffage à température de 300 °C environ puis palier d'homogénéisation ;

Montée contrôlée jusqu'à la température de début de transformation souhaitée (température de revenu) ;

Maintien à température pendant le temps nécessaire à la transformation métallurgique de toute la masse chauffée ;

Refroidissement contrôlé jusqu'à la température de 300 °C environ.

Lorsque le TTAS est effectué en vue d'un détensionnement de contrainte ou d'une stabilisation dimensionnelle (acier de construction), les étapes clefs sont :

Chauffage à température de 300 °C environ puis palier d'homogénéisation ;

Montée contrôlée jusqu'à la température de détensionnement (un palier de température est parfois nécessaire pour assurer que la masse chauffée a atteint cette température en tous points) ;

Refroidissement contrôlé jusqu'à la température de 300 °C environ.

Dans tous les cas il est important d'établir le mode opératoire de traitement sur les conditions spécifiques de TTAS du matériau validées par l'aciériste.

6.3.4 Cas des alliages d'aluminium

Pour les pièces en alliage d'aluminium, le traitement de revenu durcit la pièce par précipitation de composés intermétalliques dans la matrice aluminium.

Il s'effectue, lui aussi, à une température nettement inférieure à celle de la trempe et est suivi d'un refroidissement naturel.

Exemple (les températures et durées varient d'un alliage à l'autre) : alliage de fonderie EN AC-42200 (ancienne désignation AS7G06) :

Mise en solution : 8 à 12 heures à 535 °C ;

Trempe à l'eau (20 °C) dans les 7 secondes qui suivent la sortie du four de mise en solution;

Revenu : 6 heures minimum à 170 °C.

Pour certains alliages, on effectue une trempe, mais pas de revenu. Dans ce cas, il y a « maturation » (exemple : 5 jours à 20 °C pour les AU), c'est-à-dire que l'on considère que l'alliage atteint ses caractéristiques mécaniques seulement après cette période. Tout essai de dureté ou de résistance mécanique avant ces 5 jours n'est pas significatif.

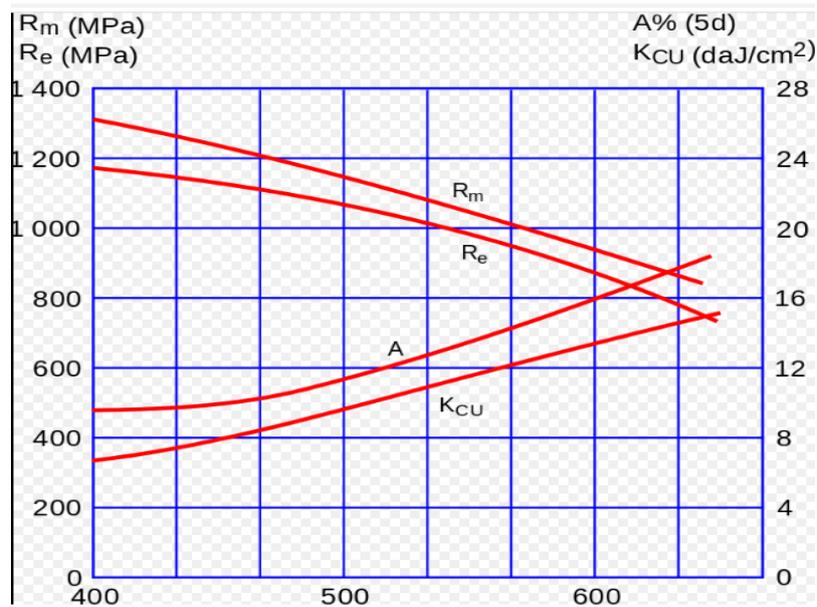


Fig. 9. Courbe de revenu (1 à 3 h) après pour l'acier 25CrMo4 (25CD4) après trempe à l'huile (835-865 °C).

Partie 7. Traitement thermique superficiel

Les traitements thermiques superficiels sont des techniques de traitement thermique d'un matériau visant à conférer à certaines pièces mécaniques des caractéristiques mécaniques différentes à cœur ou en surface.

Il s'agit d'un chauffage local de la surface d'une pièce en acier suivi d'un refroidissement à vitesse élevée, souvent réalisé par projection d'eau sous pression ou immersion. On vise à obtenir une grande dureté en surface, tout en conservant un bon allongement de la zone sous-jacente. Les moyens de chauffage les plus utilisés sont l'induction électromagnétique et le chalumeau oxy-acétylénique.

Le chauffage est localisé jusqu'à quelques millimètres à température austénitique suivie d'un refroidissement rapide sous deux formes différentes :

- utilisation d'un fluide pour les fortes épaisseurs ;
- refroidissement endogène (profite du volume intérieur et du milieu extérieur froid pour refroidir la fine couche traité).

6.7.1 Chauffage oxyacétylène (OA)

- Réalisé à avec un chalumeau.
- Vitesse de chauffe élevée (200 °C/s).
- Temps de maintien faible.
- Température et épaisseur difficiles à maîtriser.

6.7.2 Chauffage par induction

-Apport thermique par effet Joule lié à la présence de courant induit. Préférable au chauffage OA pour sa meilleure maîtrise de l'épaisseur de chauffe ainsi que de la température.

-Technique employée pour la trempe superficielle de pièces mécaniques devant conserver ses qualités internes propres et présenter une couche très dure en surface.

6.7.3 Techniques haute énergie

- Bombardement électronique
- Laser
- Torche à plasma

Ces types de chauffage sont caractérisés par :

- Chauffage très rapide (5 000 à 10 000 °C/s) ;
- Épaisseur traitée de quelques μm ;
- Très bonne maîtrise de l'épaisseur ;

Ils sont plutôt utilisés dans les traitements pour accroître la résistance au frottement.

6.7.4 Spécifié de la projection plasma

Le traitement thermique superficiel à l'aide de la projection plasma permet de contourner les deux difficultés majeures que présentent les traitements par chauffage et les traitements thermochimiques :

- Épaisseur traitée non homogène ;
- Réaction chimique entre deux métaux à compatibilité cristallographique.

La projection plasma permet un meilleur contrôle des épaisseurs et le revêtement est possible sur tous types de matériaux. Le principe consiste à projeter à chaud des particules venant s'écraser sur les surfaces à traiter. Avant le traitement, il faut préparer la surface par sablage ou décapage. L'adhérence au matériau est liée à l'énergie cinétique des particules (vitesses de 200 à 1 000 m/s). Les particules projetées peuvent être du tungstène, du cuivre, du tantale, du molybdène ou de la céramique.

6.7.5 Spécifié de la trempe superficielle par LASER permet d'obtenir dans les aciers :

- une grande rapidité de traitement, liée à l'obtention de la température de transformation en une fraction de seconde,
- une localisation très élevée du traitement (jusqu'à +/- 1 mm²),
- une grande reproductibilité,

Partie 8. Traitement thermochimique de diffusion

Le traitement de surface est une opération qui consiste à effectuer des changements de propriétés mécaniques/ physiques/ chimiques de la surface des matériaux traités. On distingue plusieurs applications : les traitements thermochimiques et les traitements de revêtement, de projection, de modification mécanique à froid (ex: traitements cryogéniques) etc. Pour les métaux, et en particulier pour l'acier, on peut modifier les propriétés des couches superficielles grâce aux traitements thermochimiques.

8.1 Les différentes phases des procédés thermochimiques

Quelles que soit l'industrie et les pièces métalliques à traiter, un traitement thermochimique est composé de quatre phases communes à tous les procédés thermochimiques :

1. dépôt des pièces dans le four, dans une zone d'introduction à température ambiante,
2. montée en température, sous atmosphère neutre avec de l'azote,

3. maintien en température dans une atmosphère spécifique à chaque traitement thermochimique. Cela est possible grâce à l'utilisation de gaz (atmosphère enrichie en atomes de carbone et/ou azote, apportés par des gaz tels que l'ammoniac ou l'acétylène), choisis en fonction des métaux à traiter,
4. descente en température (ou remontée en température pour les traitements cryogéniques) sous atmosphère inerte.

L'utilisation de molécules en traitement de surface

L'atmosphère gazeuse, dans le four à haute température, permet de faire diffuser les atomes de carbone ou d'azote dans le substrat de la pièce, et ainsi de générer une couche de revêtement fonctionnalisée.

Qu'il s'agisse d'acier doux, d'acier brut, d'acier inox, ou d'aciers alliés (chrome, zinc, nickel, etc.), le traitement de surface va permettre un enrichissement de la couche superficielle des pièces, les rendant plus résistantes contre l'usure, l'oxydation, la corrosion, etc. Les pièces auront aussi un meilleur aspect esthétique.

Pour l'aluminium et ses alliages, on applique plutôt des traitements de type d'anodisation, réalisés par bains chimiques et électrolytiques, qui pourront être suivis par une mise en peinture.

8.1 La cémentation

La cémentation est un traitement thermochimique qui consiste à faire pénétrer superficiellement du carbone dans un acier dont le pourcentage de carbone est insuffisant pour prendre de la trempe, afin de le transformer en surface en un acier fortement carburé susceptible d'être trempé.

La cémentation désigne deux procédés métallurgiques :

Historiquement, c'est un procédé de fabrication de l'acier par réaction de fer avec du monoxyde de carbone (cémentation à cœur pour obtenir de l'acier de cémentation) ;

Acception moderne : procédé de métallurgie servant à durcir les aciers par ajout superficiel de carbone, avant une trempe superficielle (cémentation superficielle pour obtenir de l'acier cémenté).

Le mécanisme est le même dans les deux cas, mais dans le procédé historique, on attend « suffisamment longtemps » pour que le carbone pénètre à cœur.

Historiquement, la cémentation désigne le fait d'enrober un objet de poudre ou de pâte, le ciment, et de faire chauffer le tout. Les composants du ciment pénètrent par diffusion dans l'objet provoquant une modification de la composition et des propriétés de l'objet. Ce procédé a été utilisé depuis très longtemps dans l'élaboration d'alliages (laiton, acier).

Dans un sens moderne, le terme peut désigner divers phénomènes :

En métallurgie :

En métallurgie extractive (métallurgie primaire, transformation de minerai en métal), la cémentation est une réaction d'oxydo-réduction consistant à réduire un sel par un métal,

En métallurgie, la cémentation est un procédé consistant à enrichir un acier en carbone, par diffusion, pour le durcir en surface, tout en conservant ses propriétés mécaniques initiales en profondeur;

En géologie, la cémentation est la précipitation de sels à la surface d'une nappe phréatique ;

Dans l'industrie du verre, la cémentation est un traitement de surface consistant en un dépôt de sels métalliques ;

Dans l'industrie du bois, la cémentation est un durcissement accidentel résultant d'un accident au cours d'un séchage artificiel.

8.1.1 Aspect métallurgique

Elle se réalise à une température comprise généralement entre 900 °C et 930 °C. La durée de traitement dépend de la profondeur désirée (de 0,1 à 3 mm). Le potentiel carbone recherché est communément de 0.85 %. Celui-ci est obtenu aujourd'hui par craquage de liquide organique directement dans le laboratoire de traitement. On utilise un mélange d'azote et de méthanol. Lors du craquage le méthanol donnera le CO et le CO₂. Le CO apportera le carbone naissant. Cette phase d'enrichissement est généralement suivie d'une trempe à l'huile et d'un revenu basse température. Un

nouveau procédé dit de cémentation basse pression remplace progressivement la cémentation atmosphérique.

Autrefois, on pratiquait la cémentation solide. On utilisait à cet effet soit des poudres, mais l'action était inégale et laissait des plages douces, soit des grains de 6 à 8 mm de grosseur qui offraient un meilleur passage aux gaz et donnaient une meilleure conductivité thermique. Le ciment de Caron était très utilisé (60 parties de charbon de bois et 40 parties de carbonate de baryum).

En plus d'une dureté superficielle élevée (58 à 63 HRC selon la température du revenu), la cémentation apporte résistance à l'usure et tenue à la fatigue.

Comme pour les traitements thermiques de trempe, il est préférable d'anticiper les variations géométriques des pièces en laissant une surépaisseur de rectification.

Après cémentation, les pièces peuvent être trempées, puis elles passent dans un four de revenu à des températures comprises entre 175 °C et 200 °C.

Les accidents de cémentation possibles sont :

-Dureté superficielle inégale

- Plage douce après trempe

Carburation insuffisante, pièces oxydées, zones ségréguées sulfureuses, pièces malpropres, température irrégulière et insuffisante en certains endroits, parties de pièces refroidies trop lentement.

-Dureté régulière mais insuffisante après trempe

Durée de l'opération trop courte ou température insuffisante, atmosphère incorrecte, régénération ou chauffage avant trempe effectué dans un four décarburant ou oxydant, température avant trempe insuffisante, vitesse de refroidissement trop faible.

-Ecaillage

- Tapures

- Criques

Constaté dans le cas d'une cémentation très prononcée et souvent trop rapide générant de la cémentite libre, son point de transformation étant différent de celui de la perlite.

-Fragilité du cœur

Régénération incomplète par suite d'une température trop faible ou d'un temps de traitement insuffisant.

-Déformations

Pièces mal soutenues dans le four, ou mauvaise présentation dans le bain de trempe ou absence de préchauffage.

8.2 La nitruration

La nitruration est un traitement de surface qui consiste à incorporer de l'azote dans la couche superficielle d'un acier, pour en modifier les propriétés mécaniques.

Un traitement de surface (TTS) est une opération mécanique, chimique, électrochimique ou physique qui a pour conséquence de modifier l'aspect ou la fonction de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données. Les traitements de surface jouent un rôle éminent dans le domaine de la tribologie.

8.2.1 Procédé

Lorsqu'il est chauffé en présence d'acier à des températures comprises entre 520 °C et 580 °C, l'ammoniac se décompose relativement lentement en ammoniac craqué, composé d'un mélange de deux gaz, l'hydrogène (H₂) et l'azote (N₂); ce dernier réagit simultanément avec le fer en diffusant sur les couches superficielles du métal traité. Il provoque la formation d'un film superficiel de nitrures de fer, appelé couche de combinaison, à partir duquel les atomes d'azote diffusent en direction du cœur de la pièce. Ce traitement, appelé nitruration, peut, selon la composition de l'acier, entraîner un accroissement très important de la dureté superficielle.

Il existe 3 procédés :

- la nitruration en phase liquide : bains de sels à base de cyanures ;

- la nitruration gazeuse : dissociation de l'ammoniac et décomposition au contact de l'acier ;

- la nitruration ionique.

Le traitement (ou procédé) de nitruration est un traitement superficiel qui consiste à plonger des pièces en alliages ferreux spéciaux (aciers au chrome-aluminium) dans un milieu susceptible de céder de l'azote (autrefois appelé nitre) en surface, à une température comprise entre 300 °C et 580 °C où l'azote peut diffuser de la surface vers le cœur de la pièce. Une fois le traitement effectué on peut observer deux couches :

La couche de combinaison, en surface, d'une épaisseur approximative de 20 μm , elle est composée de nitrures ϵ et γ' ;

La couche de diffusion plus épaisse (100 à 1000 μm), si le métal contient des éléments d'alliage il se forme des précipités de nitrures finement dispersés dans la zone de diffusion. Ces précipitations conduisent à un durcissement important, les niveaux de dureté obtenus sont compris entre 400 et 1300 HV (dureté Vickers) et cette dureté peut être conservée jusqu'à des températures de l'ordre de 500 °C. La couche de diffusion est donc plus dure que la couche de combinaison.

L'augmentation de la dureté en surface apporte des avantages certains : l'usure des pièces va être limitée, mais les pièces vont tout de même garder à cœur leurs caractéristiques mécaniques propres, en ce qui concerne la nitruration, la couche de combinaison a de bonnes propriétés de glissement ce qui peut être appréciable pour les roulements et les engrenages, cette couche pouvant être retirée si nécessaire. On utilise aussi ce procédé pour les tubes de canon de moyen calibre, dans la construction des machines-outils et des vérificateurs. Autres avantages, le durcissement est direct et ne comporte pas de trempe, les déformations sont très faibles et presque toujours faciles à prévoir (quelques microns). Par contre la nitruration présente les inconvénients suivants:

La durée de l'opération est très longue: 100 heures pour atteindre une pénétration maximum de 1 mm ;

La couche nitrurée ne peut supporter aucune déformation plastique.

8.2.2 Protection contre la corrosion

L'azote incorporé dans la couche superficielle de l'acier se place dans les espaces interatomiques des cristaux de fer. A saturation, l'azote colmate la surface de l'acier et empêche la pénétration de l'oxygène.

8.3 La carbonituration

La carbonituration est un procédé de durcissement de surface. La surface des pièces à traiter est enrichie en carbone (azote) pour former une couche martensitique dure après la trempe finale

La carbonituration est un traitement de diffusion, à base de carbone et d'azote, effectué à une température comprise entre 800 et 850 °C. Comme pour la cémentation, il y a un apport de carbone en surface mais en plus, il y a une introduction d'azote dans le four ou dans un bain liquide.

L'azote est dit fortement gammagène, tout comme le carbone l'est aussi.

En métallurgie, un élément gammagène permet de faire exister à la température ambiante la présence d'austénite. L'austénite est notée γ (gamma) dans les diagrammes de phases. L'azote joue ce rôle majeur, car peu d'addition d'azote en masse finale du métal permet à l'austénite d'exister à +20°C.

L'azote augmente le coefficient de diffusion du carbone dans l'austénite, car l'austénite peut dissoudre de grandes quantité de carbone. Ce que la ferrite, nommée α (alpha) dans les diagrammes de phases, est incapable de faire.

8.3.1 Rôle de l'azote dans un acier

Ajouter de l'azote à un acier permet des températures de carbonituration plus basses que celles utilisées en cémentation par le carbone seul, ce qui est un avantage économique important : on obtient un acier dont la surface est bien plus dure, sans avoir besoin de le chauffer à une trop haute température.

La plupart des aciers deviennent entièrement austénitiques une fois dépassé le point AC3, vers 920°C. Avec une addition d'azote, on réalise l'incorporation de carbone dans

l'acier, en surface seulement, à des températures bien plus faibles qu'avec la seule adjonction de carbone.

La cémentation consiste à enrichir en carbone la zone superficielle de pièces en acier à bas carbone, donc plutôt malléables à froid, puis à les tremper de manière à obtenir une couche martensitique dure en surface, la martensite étant résistante à l'usure, mais l'acier de base ayant un cœur inchangé, il reste tendre et ductile. Il est donc bien plus susceptible d'absorber des chocs, sans casser net comme un échantillon de même taille, entièrement martensitique.

La cémentation s'applique soit en surface soit sur l'entièreté du volume à des aciers qui contiennent des éléments d'alliage destinés à améliorer la trempabilité et à conférer à la pièce une certaine résistance à cœur, ou en surface selon la technique de cémentation retenue.

Lorsqu'on désire obtenir un résultat analogue avec des aciers qui se prêtent moins bien à la trempe, tels que des aciers de décolletage, qui eux sont enrichis d'éléments chimiques à bas point de fusion comme les aciers additionnés volontairement au plomb, au soufre, au phosphore, on procède à un traitement de carbonituration.

Dans ce cas, on ajoute à l'atmosphère de cémentation une quantité d'ammoniac généralement inférieure à 5 % du volume. Traditionnellement, les forgerons trempaient leurs pièces entièrement austénitisées dans des seaux d'urine. C'est l'urée qui assurait l'apport en azote, une flamme pauvre en oxygène ayant apporté du carbone préalablement.

À la température de traitement, l'ammoniac se décompose en azote et en hydrogène. Une partie de l'azote pénètre dans le réseau cristallin de l'acier en provoquant entre autres une augmentation importante de la trempabilité. Les pièces carbonitrurées peuvent donc ensuite être trempées.

L'urine comportant beaucoup d'eau, la carbonituration et la trempe sont faites en même temps.

8.3.2 Limites pratiques à la cémentation

Un inconvénient non négligeable est que, si l'azote augmente la trempabilité de l'acier en permettant au carbone de s'insérer dans l'austénite créée par l'azote, il abaisse fortement le point Ms (« Martensite start ») et augmente donc le volume d'austénite résiduelle qui peut être, par suite, très élevé... et cette austénite n'est guère favorable une fois l'acier revenu à froid, car l'austénite formée va créer des variations de tenue mécanique (l'austénite est ductile), à la tenue en fatigue (déchaussement avec des zones bien plus dures que l'austénite) et à la stabilité dimensionnelle des pièces : l'austénite redistribue la manière qu'à l'acier de cristalliser, avec de la distorsion entre la pièce finie avant traitement thermique et après le traitement thermique : souvent, on observe un voilement considérable, si de l'austénite formée à chaud par adjonction d'azote et de carbone existe toujours à la température ambiante.

La chromisation

La chromisation est un traitement thermo-chimique contre l'usure et la corrosion des alliages ferreux. Le chrome est diffusé dans les couches superficielles d'un acier ; on parle parfois de cémentation par le chrome. Elle ne doit pas être confondue avec le chromage, qui est un dépôt superficiel de ce métal sur de l'acier ou d'autres matériaux, ni avec la chromatation qui est un traitement de l'aluminium et du zinc (donc le cas échéant de l'acier galvanisé).

8.4 Chromage

L'opération de chromage consiste à recouvrir une pièce en métal de chrome, d'une épaisseur plus ou moins grande, de 0,5 μm (chrome décoratif) à 1/10 mm rectifié (chromage dur). Ne pas confondre avec la « finition chromique » ou « chromatation », qui est un traitement de conversion chimique dans un bain à base chrome +VI ou +III après zingage ou cadmiage, ni avec la chromisation parfois appelée chromage électrolytique.

On distingue habituellement deux sortes de chromage, les qualités demandées à la couche superficielle n'étant pas les mêmes selon les applications envisagées.

le chromage décoratif a pour but de donner aux pièces l'aspect brillant caractéristique des surfaces de chrome polies. On l'utilise par exemple pour des pare-chocs et des poignées de porte.



Fig. 10. Chromage décoratif sur une moto.

le chromage dur est utilisé dans les applications mécaniques où les conditions de frottement sont sévères comme revêtement anti-usure. On l'utilise par exemple pour des trains d'atterrissage, des systèmes de portes d'avions, etc.

8.4.1 Procédés galvaniques

Depuis les travaux de Bunsen (1854) et de Genthner (1856), l'utilisation des dépôts électrochimiques de chrome s'est largement répandue dans tous les domaines de la mécanique. La dureté, la résistance à l'usure et à la corrosion du chrome ont permis de recouvrir de ce métal des segments de piston, des guide-fils, des tiges d'amortisseurs ou de vérins, des glaces de distribution de pompes, des outillages de toutes sortes.

8.4.2 Les dépôts galvaniques présentent cependant de nombreux inconvénients :

Les bains de chromage sont à base d'acide chromique et d'acide sulfurique avec un rapport de 1/100. Le bain est à base de Cr^{6+} qui se réduit en Cr^{3+} dont les molécules se déposent sur la pièce.

Le dépôt de chrome peut être déposé directement sur la pièce selon son usage. Pour les vérins il est conseillé de réaliser une sous-couche de nickel de 20 μm pour limiter la corrosion.

Il faut savoir que le dépôt de chrome a un faible rendement cathodique (15 %) et à la cathode se produit un dégagement d'hydrogène qui fragilise l'acier et diminue sa résistance à la fatigue. Un traitement de dégazage est à faire pour retrouver les caractéristiques mécaniques de la pièce.

Pour augmenter la résistance à la fatigue, un grenaillage de précontrainte peut également être réalisé avant chromage.

Des améliorations ont été apportées au procédé, pour éviter l'apparition de microfissures dans les dépôts, pour obtenir une certaine micro-porosité favorable à la rétention de lubrifiants, pour remplacer le chrome hexavalent par le chrome trivalent moins toxique, etc.

L'électrodéposition sous courants pulsés améliore considérablement la vitesse de déposition et le rendement cathodique.

8.4.3 Procédés de dépôt sous vide

On peut réaliser le chromage par dépôt physique en phase vapeur (PVD).

La technique la plus prometteuse est sans doute la pulvérisation cathodique magnétron (PCM).

Cette opération se passe dans une enceinte à vide contenant de l'argon ou un autre gaz inerte sous très faible pression (quelques centièmes de torr). Une cible composée d'un métal M est portée à une tension négative suffisamment élevée pour que le champ électrique ainsi créé puisse ioniser l'atmosphère dans son voisinage. Les ions argon qui résultent de ce champ sont attirés par la cible, qu'ils frappent violemment, arrachant des atomes du métal M et les projetant dans l'environnement. Ces atomes vont alors se condenser sur la surface des objets placés en face de la cible. On obtient alors la « pulvérisation cathodique diode », qui est très lente. Il faut entre 10 min et 1 h pour obtenir une épaisseur de dépôt de l'ordre du μm . En appliquant en plus un champ magnétique perpendiculaire au champ électrique, on accroît de façon significative la densité du plasma qui se forme autour de la cible, la vitesse de déposition peut alors atteindre une valeur industriellement acceptable de l'ordre de $1 \mu\text{m}/\text{min}$.

Les dépôts réalisés par PCM sont beaucoup moins fissurés et beaucoup plus compacts que ceux qui sont réalisés par voie galvanique mais ils sont aussi nettement moins durs. La présence dans l'enceinte de traces d'autres éléments comme l'oxygène, l'azote, le carbone, permet de corriger ce défaut et même d'atteindre des duretés bien plus élevées. On peut montrer par diffraction de rayons X que ces éléments ne se combinent toutefois pas avec le chrome, de sorte que leur action n'est pas facile à interpréter.

Les essais de frottement réalisés sur les couches obtenues par PCM montrent que la résistance à la fatigue des pièces ainsi traitées est bien supérieure à ce que l'on obtient par voie galvanique, et naturellement il n'y a plus aucune fragilisation par l'hydrogène.

Partie 9. Etude du diagramme temps-température- taux de transformation

Le diagramme temps-température-transformation, ou diagramme TTT, est utilisé pour étudier les transitions de phases ou d'état, spécialement pendant les traitements thermiques dits de revenu.

Ce type de diagramme s'obtient par des expériences de trempe suivies d'un maintien à une température donnée. On mesure alors le taux de transformation.

Il existe une compétition entre l'énergie motrice de transformation et de diffusion :

À une température donnée il faut un certain temps pour commencer la transformation de phase. Ce temps augmente lorsqu'on s'approche de la température de transformation à l'équilibre (diagramme de phase). En effet, une différence de température est nécessaire pour commencer la transformation : c'est l'énergie motrice de transformation.

Au contraire lorsqu'on diminue la température vers l'ambiante, la diffusion dans le solide devient plus lente. Cette diffusion est nécessaire à la transformation de phase. Le début de la transformation apparaît donc également après un temps plus long.

Si on refroidit le matériau très rapidement (trempe) jusqu'à une température suffisamment basse, il n'y a pas de diffusion possible, la transformation est dite displacive (exemple : Transformation martensitique).

Ces diagrammes sont dans la réalité très délicats à obtenir car ils nécessiteraient un maintien homogène et très précis de la température de l'éprouvette d'essai. Dans l'industrie, les diagrammes TRC sont donc préférés car ils correspondent à des courbes à refroidissement constant. Ils sont donc plus proches des conditions de refroidissement industrielles.

Ce type de diagramme est également utilisé en science des polymères et permet de différencier les phases liquides, gels et verres.

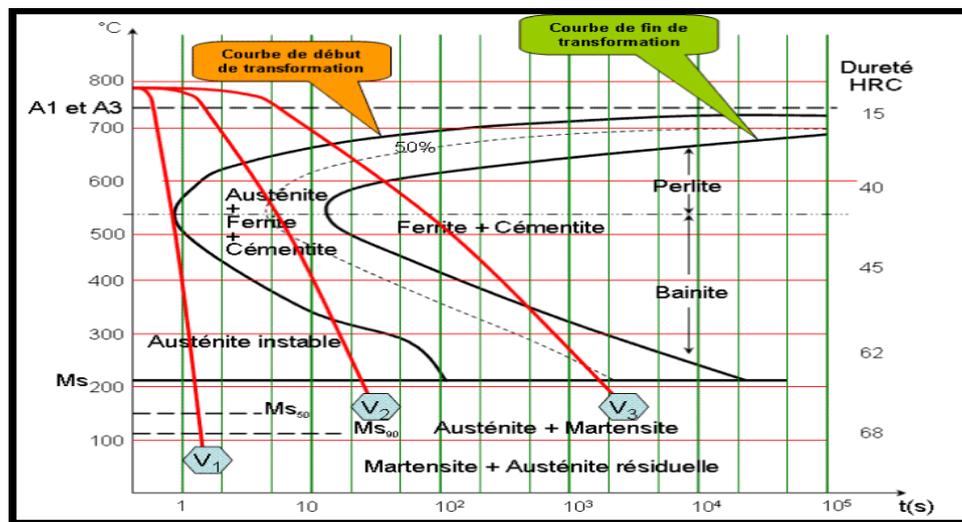


Fig. II. Diagramme Temps, température, taux de transformation.

L'aspect global des courbes peuvent donner des informations sur la teneur en carbone de l'acier non-allié qu'elles représentent:

Si les courbes ont une asymptote à 723 °C (ligne A1 ou Ael), ce sera un acier eutectoïde à 0,77 % de carbone.

Si les courbes ont une asymptote Acm (ou Aecm), ce sera un acier hypereutectoïde à entre 0,77 % et 2 % de carbone.

Si les courbes ont une asymptote à A3 (ou Ae3) ce sera un acier hypoeutectoïde à moins de 0,77 % de carbone.

Les différentes lignes citées ci-dessus ont les caractéristiques suivantes :

La ligne A1 (ou Ael) représente la température où débutent les transformations eutectoïdes, elle vaut toujours 723 °C pour un acier non-allié.

La ligne A3 (ou Ae3) représente la température de transformation de l'austénite en ferrite. Sa valeur dépend du taux de carbone, elle varie entre 723 °C et 910 °C.

La ligne Acm (ou Aecm) représente la température de transformation de l'austénite en perlite. Sa valeur dépend du taux de carbone, elle varie entre 723 °C et 1130 °C.

Partie 10. Observations micrographiques et caractéristiques physiques et mécaniques

Dans les métaux, les atomes sont organisés sous la forme de cristaux : ils forment une structure ordonnée. Des atomes étrangers — impuretés, éléments d'alliage — peuvent s'introduire dans ce réseau, soit en substitution des atomes « de base », soit en insertion, c'est la notion de solution solide.

Par ailleurs, il peut y avoir des cristaux de plusieurs types, comme des inclusions par exemple. Les cristaux minoritaires sont appelés « précipités ».

Avec l'élévation de la température, les atomes du cristal s'agitent autour de leur position et s'écartent les uns des autres, provoquant la dilatation. Cela a plusieurs conséquences :

L'espace entre les atomes augmente, ce qui permet d'accueillir plus d'atomes en solution d'insertion, et des atomes plus gros ;

Par conséquent, on peut avoir une dissolution des précipités : les atomes de ces cristaux passent en solution solide ;

Les atomes s'agitant, ils deviennent mobiles et peuvent se déplacer dans le cristal, phénomène appelé diffusion ;

Dans certains cas, les atomes du cristal se réorganisent en une autre phase cristallographique, on parle d'allotropie.

Ce sont ces mécanismes qui entrent en jeu lors des traitements thermiques.

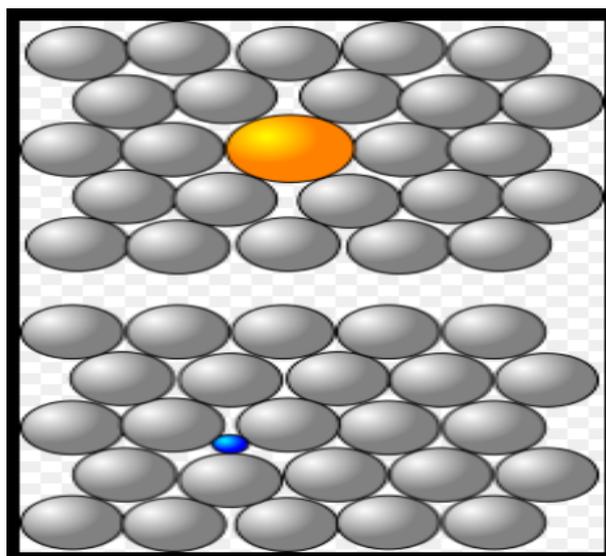


Fig. 12. Solution solide de substitution (haut) et d'insertion (bas) dans un cristal.

10.1 Cas des matériaux ductiles

Un matériau ductile est un matériau pouvant se déformer plastiquement ; ceci est utilisé pour la mise en forme (laminage, tréfilage, forgeage, etc.). Cette déformation provoque des défauts d'organisation des atomes dans le cristal, ce qui durcit la matière : ce phénomène est l'écrouissage.

Si l'on chauffe de manière modérée le métal, on donne de la mobilité aux atomes, ils se réorganisent et éliminent les défauts d'organisation. On adoucit ainsi la matière. Ce procédé est appelé recuit.

10.2 Cas des précipités

Les précipités ont pour effet de durcir la matière, ce que l'on nomme le durcissement structural. Lorsque l'on chauffe suffisamment le métal, les précipités se dissolvent, cette phase est appelée « mise en solution ». Si l'on laisse le métal se refroidir lentement, les précipités se reforment. Par contre, si l'on refroidit rapidement — trempe —, alors les atomes n'ont pas le temps de bouger pour reformer les précipités, ils restent en solution. Une fois à température ambiante, les atomes n'ont plus assez de mobilité pour former les précipités.

Si l'on chauffe modérément le métal, on redonne de la mobilité aux atomes et l'on reforme des précipités. Ce procédé, appelé maturation, est utilisé pour les alliages d'aluminium et pour les aciers à haute limite élastique.

10.3 Cas des transformations allotropiques

Pour certains métaux, l'organisation des atomes change au-dessus d'une certaine température. Si l'on refroidit rapidement par une trempe, alors les atomes n'ont pas le temps de bouger pour reprendre leur structure à basse température. Cela peut produire des effets divers selon l'alliage. On peut jouer sur la vitesse de refroidissement pour laisser les atomes se réorganiser partiellement.

La trempe s'effectue après une mise en solution de certains composés : Il s'agit de maintenir le matériau à tremper à une température suffisante et suffisamment

longtemps. On plonge ensuite la pièce dans un liquide (bain d'huile, eau, plomb fondu, etc) ou on le refroidit avec un gaz (azote, air, etc.).

10.4 Le cas de traitement thermique des aciers

Les traitements thermo-chimiques à température élevée permettent de renforcer la partie externe d'une pièce et d'obtenir de meilleures propriétés de surface. Quasiment toutes les pièces en acier utilisées dans la vie courante ont subi un traitement de durcissement ou de fonctionnalisation de surface.

La dureté et la résistance à la corrosion et à l'usure d'un acier dépendent principalement :

- de sa teneur en carbone, de sa composition chimique (acier faiblement allié, si la présence d'éléments d'alliage tel que nickel, chrome, molybdène vanadium est inférieure à 5 %, ou fortement allié si supérieure),
- et de sa structure cristalline.

Dans le secteur de l'acier, le traitement thermique est crucial à la fois dans la phase de transformation primaire des matières premières sous la forme de brames, billettes, lingots et dans la phase de transformation secondaire de l'acier en produits finis (par ex. les pièces cémentées pour les mécanismes automobiles), utilisés dans de nombreux secteurs industriels.

Le suivi et le contrôle des températures de l'acier au cours de ces deux phases sont cruciaux pour assurer la qualité du produit, l'efficacité des process, la productivité et le rendement.

Dans un tel contexte, le profilage des températures n'est bien évidemment pas des plus faciles, mais il y a certaines exigences pour concevoir une gamme de solutions techniques uniques, innovantes et adaptées à chaque utilisation.

10.4.1 Agir sur la dureté des aciers

Indépendamment du type d'acier, les traitements thermo-chimiques à température élevée permettent de renforcer la partie externe d'une pièce et d'obtenir de meilleures

propriétés de surface par rapport aux propriétés à cœur. Ils agissent exclusivement sur la structure physico-chimique des couches superficielles de la pièce métallique en l'enrichissant en carbone ou en azote. Ils améliorent les phases cristallines et structurales sans modifier la partie interne de la pièce.

Un traitement thermo-chimique tel que la nitruration ou la cémentation, apporte les différents éléments d'alliage (carbone et azote atomiques) à travers le gaz : la pièce est chauffée dans une atmosphère réactive riche en carbone (C) et azote (N_2). Pendant la phase de maintien en température, les composants atomiques C et N_2 diffusent dans les premières couches de l'acier (1mm maxi) et créent une couche métallique avec des caractéristiques chimiques différentes du métal de base. Une trempe rapide est souvent réalisée pour refroidir et figer les atomes dans la matière et obtenir la composition structurale souhaitée. L'effet du refroidissement rapide peut générer des fragilités caractéristiques dans le matériel, un processus de revenu en atmosphère neutre et à température inférieure est donc appliqué pour éliminer ces contraintes internes non souhaitées.

A l'état normal, les atomes de fer et de carbone qui constituent l'acier ont une forme cubique. Lorsque l'on porte l'acier à une température élevée, il obtient une nouvelle structure dite « austénitique », dont les atomes de fer et de carbone ont une forme cubique à faces centrées. Par la suite, le refroidissement, permet d'obtenir une nouvelle structure moléculaire, l'acier devenant ainsi de la martensite ou de la bainite, selon la vitesse de refroidissement.

Dans le bain de refroidissement, il faut réguler minutieusement la température, car elle a un impact sur la structure du matériau et donc sur sa dureté. On peut ainsi générer de l'austénite ou de la martensite. La martensite plongée pendant quelques heures ou jours dans un bain à une certaine température peut aussi devenir de bainite. Dans ce cas de figure, la dureté est équivalente à celle de la martensite, mais possède une ténacité supérieure.

Au final, le traitement thermique d'un acier aboutit sur différents composants : martensite, austénite ou bainite. Chacun a ses propres caractéristiques en matière de résistance et de dureté.

Une trop grande dureté rend le matériau fragile et en général on fait une opération de stabilisation à température modérée pour supprimer cette fragilité.



Fig. 13. les traitements thermiques d'un acier.

Partie II. Analyse des trois types de traitement thermique appliqués aux aciers

II.1 Le recuit

Le recuit est un traitement qui consiste en premier lieu à mettre une pièce à une température élevée, entre 450 °C et 1100 °C. La température est déterminée selon les résultats recherchés. En second lieu, il consiste à garder la pièce chauffée à la température pendant un certain temps, puis à la refroidir convenablement pour obtenir le résultat escompté.

Grâce au recuit, toute déformation du métal est éliminée ou diminuée. Ces contraintes pourraient être des conséquences d'un précédent traitement thermique ou de n'importe quelle action antérieure au traitement en cours. Le recuit permet d'avoir un métal structuré et prêt à un usinage ou une déformation ultérieure. Le recuit intervient avant et après la formation du métal.

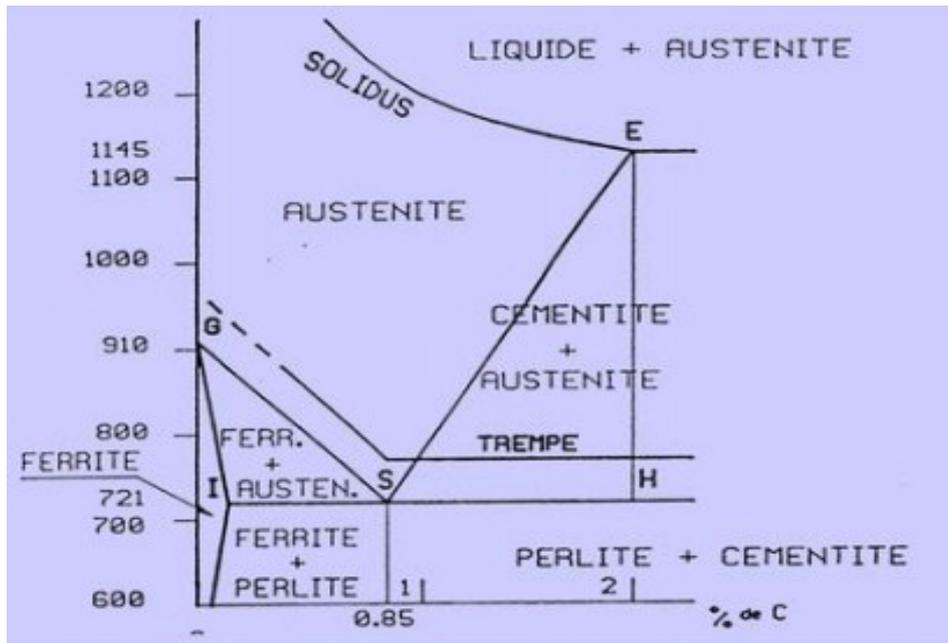


Fig. 14. Diagramme d'équilibre de l'acier.

Le présent traitement thermique consiste méthodologiquement à réchauffer au-dessus de la ligne GSH c'est-à-dire dans le domaine austénitique, qui a pour objectif d'atténuer les déséquilibres pouvant exister dans l'acier, à savoir de supprimer les effets des traitements thermiques antérieurs. Il est suivi d'un refroidissement assez lent à l'air libre ou dans le four éteint.

11.2 La trempe

Le durcissement par trempe se déroule en deux étapes. D'abord intervient le chauffage de la pièce. Autrement, il s'agit de la mise en solution ou de l'austénitisation. Pour chauffer la pièce, il faut une température appropriée. Ensuite vient le refroidissement de la pièce.

Pour réaliser ce refroidissement, il faut plonger la pièce dans de l'eau ou dans de l'huile, ou encore avec de l'air. De plus, le refroidissement se fait suivant une vitesse donnée qui doit être adéquate. Par ailleurs, il est possible d'énumérer également des sels comme le nitrate ou le nitrite et des émulsions polymères-eau. En effet, l'objectif principal de la trempe c'est de durcir l'acier. Grâce à ce type de traitement, vous pouvez avoir des aciers assez durs et solides.

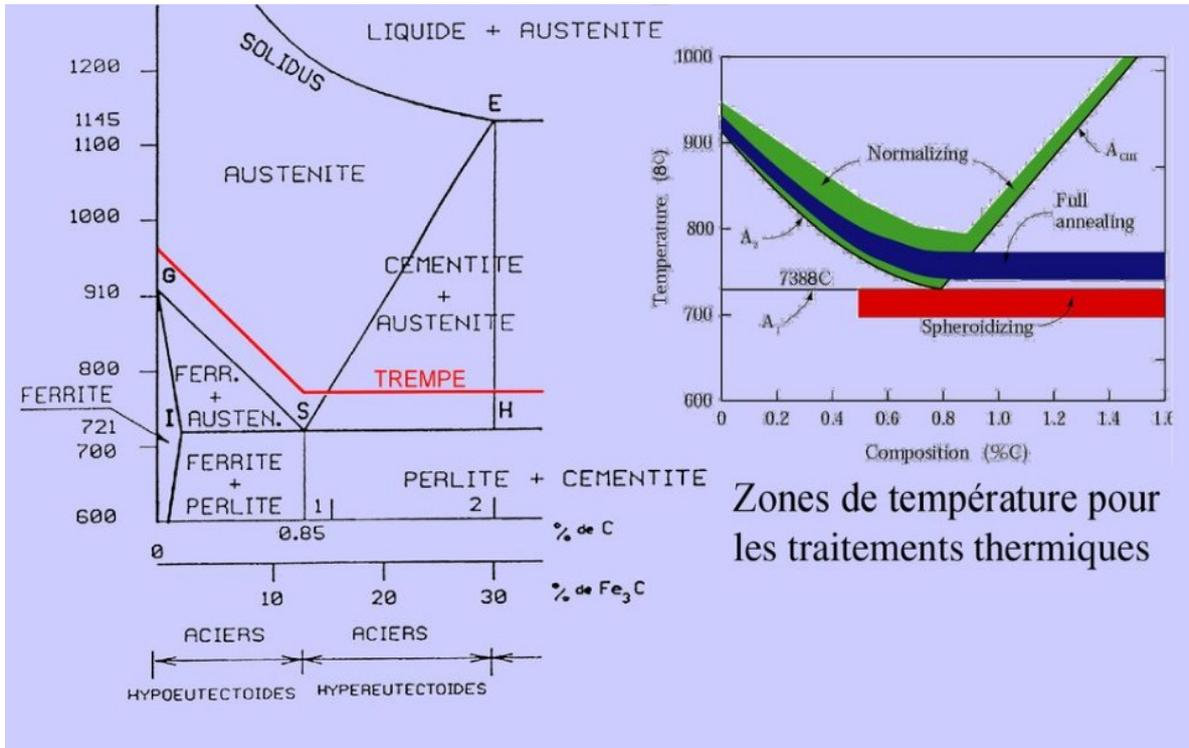


Fig. 15. Transformation de phases de l'acier.

Le type de processus de refroidissement a tendance à engendrer des transformations de phase entre austénite- martensite- bainite - perlite (voir représentation schématique ci-dessous) qui reflète le comportement microscopique de la configuration atomique de l'acier

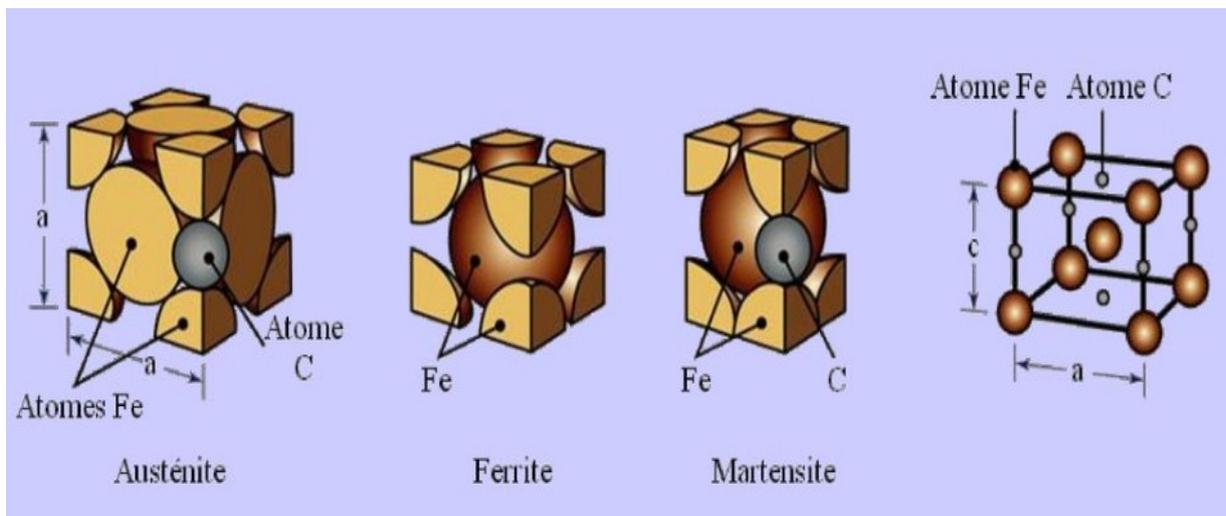


Fig. 16. la structure atomique de l'acier selon le type de phase.

Suite à une opération de refroidissement rapide l'austénite se transforme en martensite.

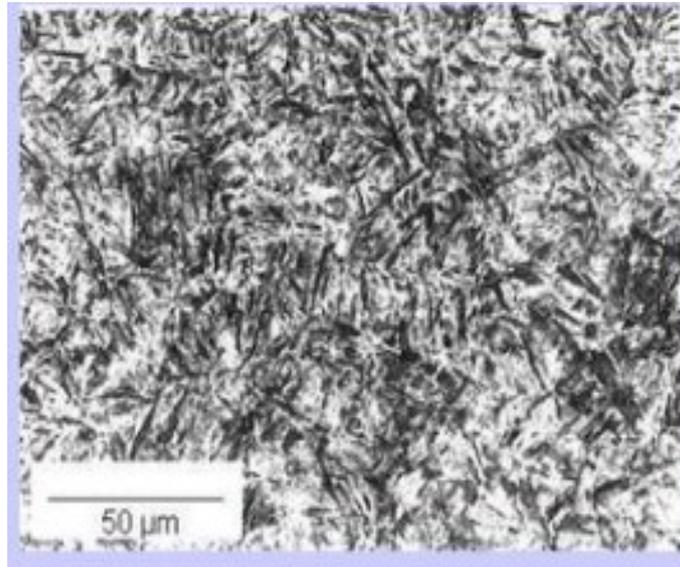


Fig. 17. La phase martensitique.

Cependant, suite à une opération de refroidissement lent l'austénite se transforme en bainite.

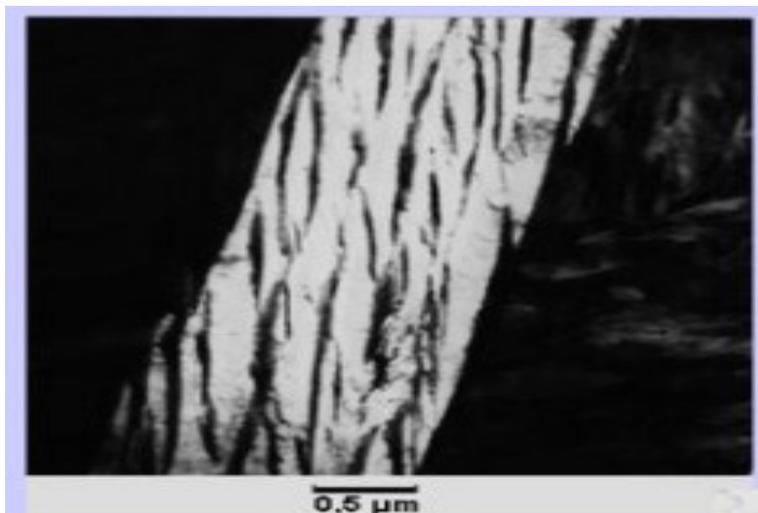


Fig. 18. La phase bainitique.

Tandis que, suite à une opération de refroidissement naturel l'austénite se transforme en perlite (89 % ferrite et 11 % cémentite).

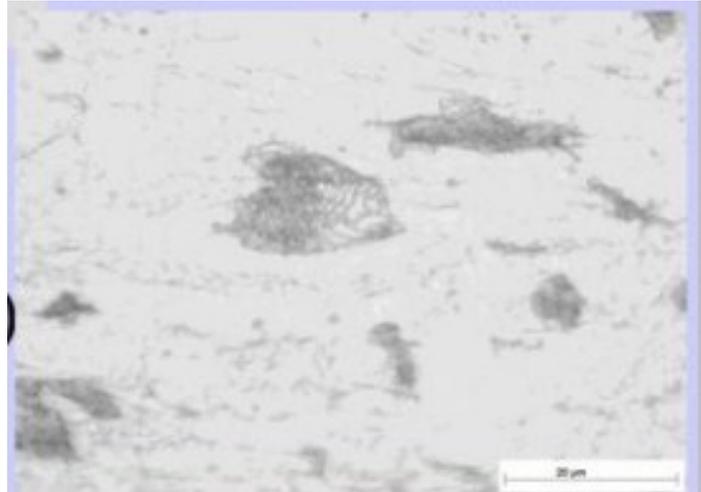


Fig. 19. La phase perlitique.

II.3 Le revenu

Le revenu consiste à chauffer des aciers à température élevée au-delà de 700 °C, à garder la pièce à la température précédente pendant un temps et à la refroidir de manière appropriée.

Ce type de traitement vient réduire les conséquences de la trempe en renforçant la ténacité de la pièce. On parle de revenu, car c'est un traitement fait sur un acier qui a déjà été trempé. Lorsque l'acier trempé est traité à 500 °, il s'agit d'un revenu. Cependant, une fois que l'acier n'a connu aucun traitement préalable, il s'agit d'un recuit.

II.4 Cycle thermique

- Chauffage : s'effectue à température déterminée selon les caractéristiques à obtenir mais toujours inférieure à A_{c1} à savoir entre 500°C et A_{c1}
- Maintien à température constante.
- Refroidissement : refroidissement rapide souvent à l'huile.

II.5 Principaux types de Revenu (spécifiquement aux aciers)

- Revenu de détente à 200°C : pour les pièces accepté admet une valeur de K faible et H élevée.

- Revenu de structure appelé aussi revenu classique à 600°C : c'est le plus courant pour les aciers de construction. La valeur K augmente et H diminue.
- Revenu de durcissement (température entre 200°C et 600°C).

Comme exemple on examine l'évolution des propriétés mécaniques étudiées $R_r, R_e, H_B, A\%, K$ suite à une opération de revenu appliquée sur deux aciers à savoir l'acier martensitique 34 Cr Mo 4 et l'acier non allié C 38 comme montré respectivement sur les deux tableaux suivants :

Tableau 2. La variabilité de la résistance mécanique et de l'allongement issue d'opération de revenu suite d'une opération de trempe classique.

Acier martensitique 34 Cr Mo 4		
Mode de traitement thermique	R_m (N/mm ²)	A %
Trempe à 850 °C	1920	
Trempe à 850 °C + Revenu à 200 °C	1800	5,5
Trempe à 850 °C + Revenu à 400 °C	1500	7
Trempe à 850 °C + Revenu à 600 °C	1050	13

Tableau 3. La variabilité paramétrique issue d'opération de revenu suite d'une opération de trempe classique.

Acier martensitique 34 Cr Mo 4			
Mode de traitement thermique	R_m (N/mm ²)	Hv	KCU (N/cm ²)
Trempe à 850 °C	1820	557	9
Trempe à 850 °C + Revenu à 200 °C	1760	543	17,3
Trempe à 850 °C + Revenu à 400 °C	1290	381	54,2
Trempe à 850 °C + Revenu à 600 °C	870	257	132

[<https://www.unifonds.fr/fabrication/traitement-thermique/>]

D'où les principaux types de traitement thermique vu précédemment sont exprimés en fonction du temps. Comme le montre clairement le schéma suivant :

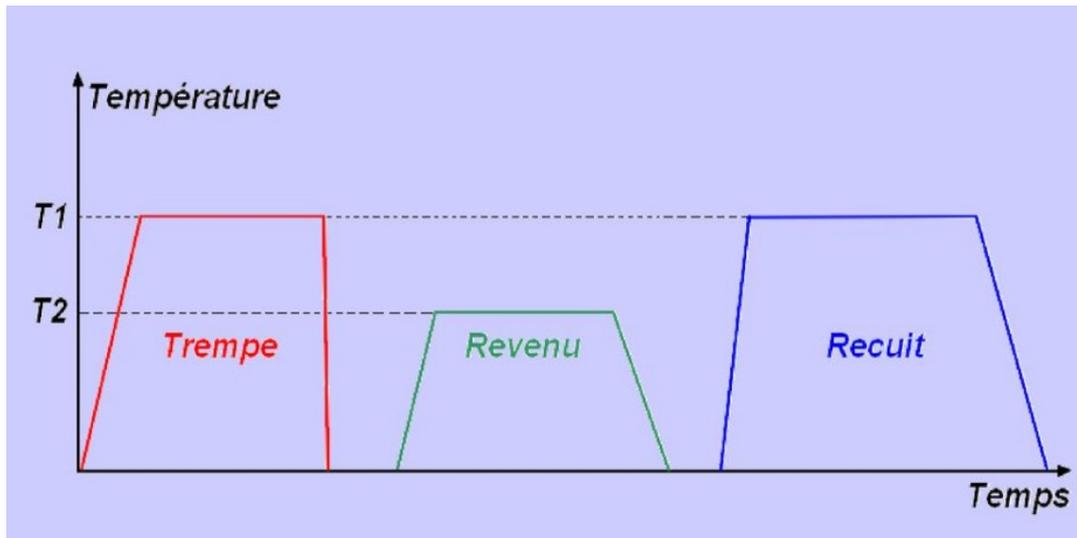


Fig. 20. Les trois modes de traitement thermiques relatifs à l'acier.

Partie 12. Prédire et prévoir le comportement du matériau (acier) sous l'effet du T.T

Les modifications structurales au cours de revenu ont des conséquences importantes sur les propriétés mécaniques. La variété des structures obtenues explique que le revenu constitue un moyen efficace et très souple pour obtenir un ensemble de propriétés ajustées aux exigences de fonctionnement et il faut envisager des interférences possibles pour expliquer finalement les variations des propriétés obtenues.

La composition chimique de l'acier est un facteur intrinsèque qui doit être connu avec une très grande précision pour pouvoir prédire et prévoir son comportement sous l'effet de revenu.

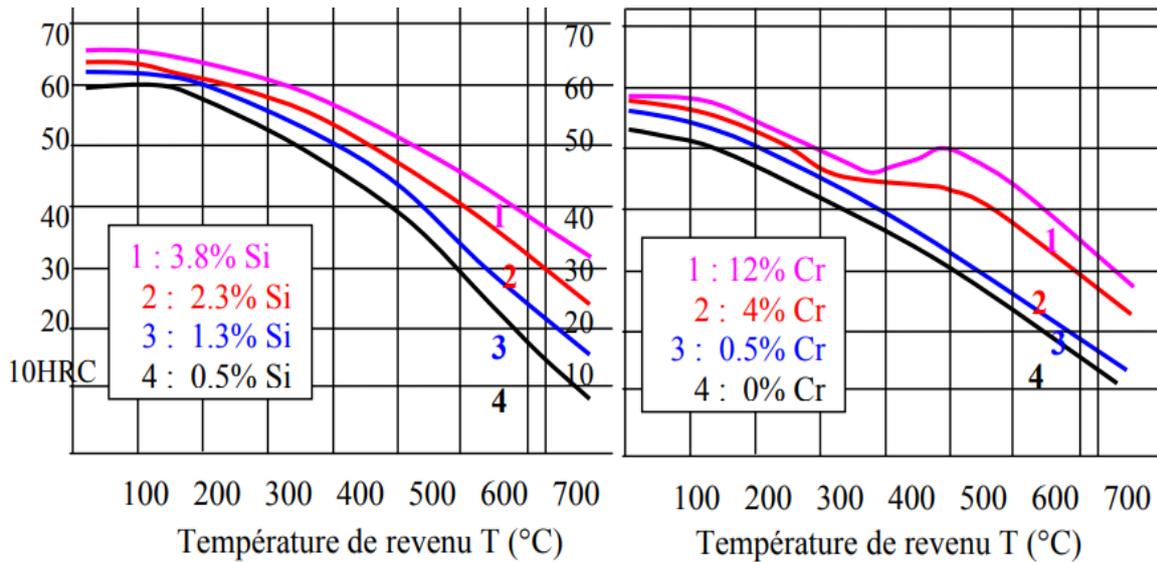


Fig. 21. Influence de composition chimique sur le comportement de l'acier ayant subi une T.T.

Pour chaque température, la courbe caractéristique est marquée par une baisse notable de la dureté pendant quelques minutes suivie ensuite d'une diminution progressive mais très lente.

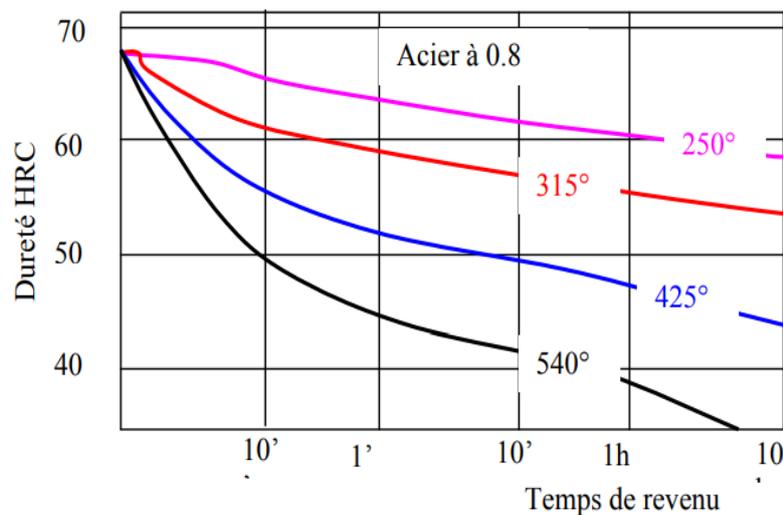


Fig. 22. Variation de la dureté en fonction du temps de maintien pour quatre températures de revenu de l'acier à 0.8%C.

Il s'avère donc que le revenu est un traitement qui a une influence sur les propriétés mécaniques des aciers. La variation de ces dernières présente une allure qui se répète dans toutes nuances d'aciers (figure VI.4)

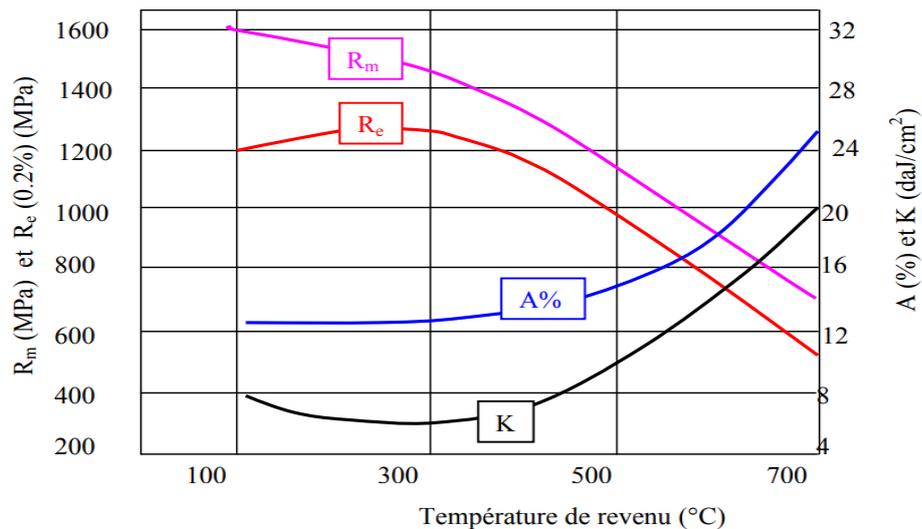


Fig. 23. Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu de l'acier 25CrMo4.

Le revenu est un cycle thermique que subit la pièce, consistant en un chauffage entre 200° et 600°, puis d'un maintien à température suivi d'un refroidissement lent.

12.1 Cas des alliages d'aluminium

Certains alliages d'aluminium présentent un durcissement par formation de précipités avec des éléments d'alliage : Al_2Cu pour les alliages contenant du cuivre, Mg_2Si pour les alliages contenant du magnésium et du silicium, etc. Ce phénomène est appelé durcissement structural.

Avec l'élévation de température, vers 500 °C, ces précipités se dissolvent, c'est la mise en solution. La trempe empêche la reformation des précipités. À l'inverse des aciers, la trempe a donc pour conséquence un adoucissement de l'alliage.

Le revenu (tempering)

Le revenu se pratique après une trempe, pour réduire les contraintes internes créées durant celle-ci. Le revenu doit être fait dans les 4 heures après le traitement thermique. Le revenu permet d'améliorer la résistance mécanique des pièces traitées, de rétablir les valeurs de résilience et de rendre l'acier moins fragile, plus ductile. La dureté diminue également quelque peu (Dissolution de certains composés fragiles tels que les carbures favorisées).

La méthode consiste à chauffer la pièce à une température inférieure à celle d'austénitisation, température déterminée en fonction du type de matériau, et de refroidir cette pièce très lentement.

Remarque :

L'utilisation d'un four à vide permet à la matière de rester pure et d'éviter une décarburation en surface ce qui fragilise l'acier en diminuant la teneur en carbone.

II.2 Le recuit complet

« Ce traitement consiste à chauffer l'acier à une température appropriée et à traverser ensuite le domaine de transformation par un refroidissement lent effectué de préférence dans le four ou toute autre installation bien isolée thermiquement. Le refroidissement lent se poursuit généralement aux basses températures. Le but du recuit peut être d'affiner le grain, d'adoucir l'alliage, d'améliorer l'usinabilité. ⁶»

Le recuit se fait après un traitement mécanique, une opération de soudage, etc. afin de rendre plus homogène le matériau et lui rendre une partie de ses propriétés antérieures. Pour les aciers, on distingue deux types de recuits :

Soit on chauffe jusqu'à austénitisation totale de la pièce mais sans laisser les grains trop grossir, puis on laisse refroidir lentement, ce qui lui fait retrouver ses anciennes propriétés ; on « rejoue » en quelque sorte la solidification, les grains de ferrite et de cémentite sont recréés à partir de l'austénite ;

Soit on chauffe en dessous de la température d'austénitisation, juste pour activer la mobilité des atomes.

Le recuit permet aussi de diminuer la densité de dislocation résultante de la déformation plastique subie par le matériau lors du traitement mécanique. En augmentant la température, on augmente la diffusion des atomes et donc la mobilité des dislocations qui peuvent ainsi se combiner et disparaître. Deux phénomènes peuvent alors se produire : un adoucissement, aussi appelé restauration, qui correspond à une diminution simple de la densité de dislocation ou une recristallisation lorsque la densité de dislocation présente dépasse un seuil critique.

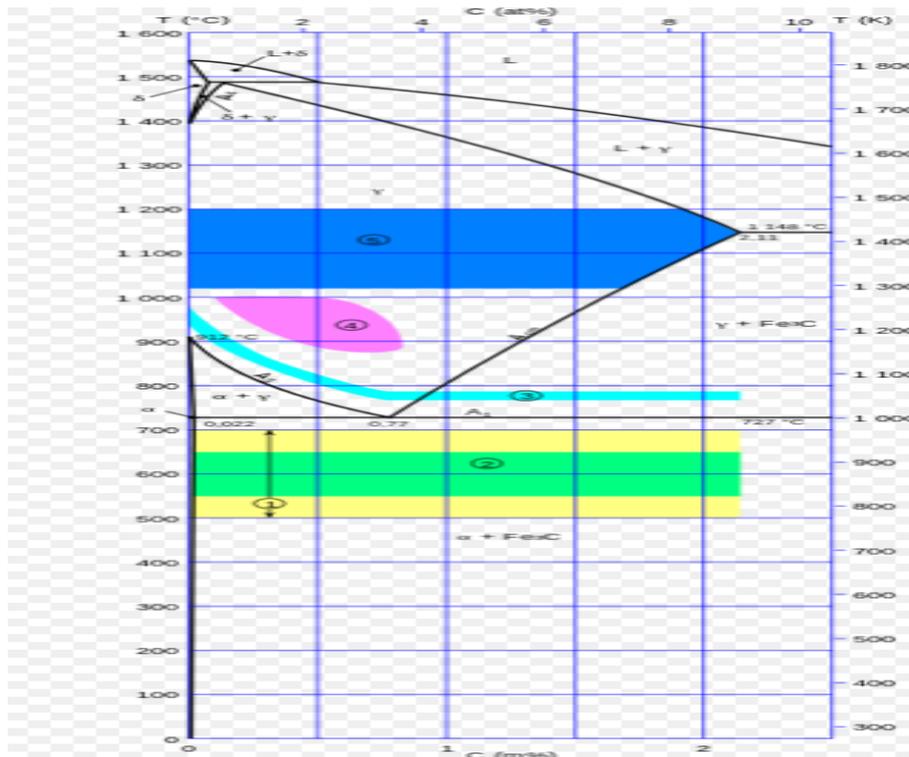


Fig. 24. Température de traitement thermique des aciers.

Température de traitement thermique des aciers en fonction de la teneur en carbone

Les numéros en cercle de 1 à 6 sont expliqués selon le mode thermique comme suit :

1. recuit de recristallisation ;
2. recuit de détensionnement ;
3. température d'austénitisation (trempe) ;
4. recuit complet ;
5. recuit d'homogénéisation

12.3 La maturation

La maturation est un chauffage modéré. Son but est de donner de la mobilité aux atomes pour leur permettre de former des précipités. On utilise parfois le terme « vieillissement », traduction littérale du terme anglais ageing.

Le but de la maturation est de provoquer un durcissement structural. Il est utilisé sur les aciers à haute limite élastique dits « maraging », et sur certains alliages d'aluminium.

12.4 Courbes de refroidissement

Pour aider les métallurgistes et concepteurs à la réalisation de pièces destinées à la trempe, il existe des abaques de refroidissement qui permettent de savoir en fonction de la teneur en carbone, du temps et du type de refroidissement (huile, eau...), de connaître les constituants métallographiques présent lors de la transformation, et une fois la pièce froide, ce qui permet de s'assurer que les caractéristiques obtenues correspondent à celles recherchées. Il existe deux types de courbes de refroidissement:

Les courbes obtenues en refroidissement continu, ou diagrammes TRC ;

Les courbes obtenues avec des paliers isothermes, ou diagrammes TTT.

12.5 Les technologies de mise en température et de traitement

Les mises en température sont effectuées dans des fours le plus souvent à atmosphère contrôlée ou à bain de sel.

Les atmosphères contrôlées permettent soit de protéger le matériau, contre l'oxydation par exemple, soit d'apporter une couche supplémentaire au matériau (par exemple, du carbone ou de l'azote pour l'acier pour améliorer les caractéristiques mécaniques externes).

Les systèmes de fabrication d'atmosphère sont appelés générateurs qui peuvent être exothermiques ou endothermiques. Les générateurs exothermiques sont constitués de brûleurs qui appauvrissent en oxygène l'atmosphère du four et évitent ainsi l'oxydation du matériau. Les générateurs endothermiques sont des systèmes qui produisent des atmosphères actives (par exemple du monoxyde de carbone fixant du carbone sur l'acier). Ces atmosphères, actives ou passives, présentent des risques importants (intoxication au monoxyde de carbone, explosion en cas d'utilisation d'hydrogène)⁷. Les risques liés à l'utilisation de ces techniques sont considérablement réduits par l'utilisation de fours à basse pression (dits « fours à vide ») qui nécessitent peu de quantités de gaz d'atmosphère.

Les fours à bain de sels permettent une autre technique d'apport de molécules actives en surface du matériau, par contact avec un liquide. Par exemple, les bains de cyanure

permettent d'apporter des atomes d'azote pour effectuer une nitruration⁸. Les fours à basse pression remplacent avantageusement les bains de sels de ce type en permettant un apport d'azote sous forme gazeuse et en faible quantité, ce qui est beaucoup moins dangereux que l'emploi des composés azotés liquides à base de cyanure.

En guise de conclusion.

Les avantages et les inconvénients des traitements thermiques

Le traitement thermique a pour but de changer les propriétés mécaniques, physiques, et parfois chimiques d'un matériau. Ces changements s'effectuent dans des fours avec une atmosphère gazeuse contrôlée, sans humidité (eau) ou oxygène, et en suivant des cycles contrôlés de variation de pressions et températures élevées (chauffage suivi par un refroidissement rapide).

Les avantages des traitements thermiques

L'avantage est de conférer aux métaux, tels que les aciers et autres alliages métalliques, de nouvelles caractéristiques, comme une meilleure résistance à la corrosion, une augmentation de la dureté, une stabilité dimensionnelle, un état de finition superficielle de qualité (brillance) ou une augmentation de la résistance à l'oxydation dans le temps. Les pièces ainsi traitées gagnent en fonctionnalité et deviennent ainsi des pièces à valeur ajoutée importante.

Les inconvénients des traitements thermiques

Si le traitement thermique est mal appliqué, les pièces deviennent des rebuts difficilement réutilisables : surface noircie et oxydée dû à la présence de vapeur d'eau dans le four, modification non souhaitée de la composition (décarburation superficielle), variation de dureté non homogène sur la surface, pénétration du traitement variable selon la géométrie de la pièce, etc. L'entretien du four et du réseau de distribution des gaz est indispensable pour garantir un résultat final conforme aux attentes, et pour assurer la sécurité des opérateurs.

Références

- [1] Jean-Marie Georges, Frottement, usure et lubrification: tribologie ou science des surfaces, Paris, Eyrolles, 2000, 424 p. (ISBN 2-212-05823-3).
- [2] <https://www.unifonds.fr/fabrication/traitement-thermique/>
- [3] Dominique Ghiglione, Claude Leroux et Christian Tournier, « Pratique des traitements thermo-chimiques », Éditions techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques.
- [4] [<https://bruval.ch/fr/construction-mecanique/traitement-thermique/>]
- [5] Michel Dupeux, « Aide-mémoire de science des matériaux », Dunod, 2005.
- [6] Sidney H. Avner, Introduction à la métallurgie physique, Centre collégial de développement de matériel didactique, p. 281.
- [7] R. Fayolle et B. Courtois, Ateliers de traitement thermique — Hygiène et sécurité, INRS, 2001.
- [8] J. Barralis et G. Maeder, Précis de métallurgie — Élaboration, structures-propriétés et normalisation, Nathan/Afnor, 1991 (ISBN 2-09-194017-8), p. 70-104, 125-127.