

Partie 8

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 :

Dr. HABIBI Samir

Traitement thermique (T.T)

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

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 :

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 carbonitruration

La carbonitruration 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 carbonitruration 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 M_s (« 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 grenailage 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.

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.