

Traitements thermiques superficiels des alliages ferreux

BAYA MELIK

Université BISKRA

Table des matières



I - Traitements thermiques superficiels des alliages ferreux	3
1. Trempe superficielle	3
1.1. La trempe à la flamme	6
2. Les traitements thermochimiques	9
2.1. Les différents traitements thermochimiques	10
Glossaire	15
Abréviations	16
Références	17
Webographie	18

Traitements thermiques superficiels des alliages ferreux



Les traitements thermiques TT* superficiels des alliages ferreux sont des procédés utilisés pour modifier les propriétés de la surface des pièces en acier ou en fonte sans affecter significativement leur structure interne. Ces traitements thermiques sont appliqués pour améliorer la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion, la dureté et d'autres caractéristiques de surface.

1. Trempe superficielle

Définition

Le traitement consiste à porter rapidement la zone superficielle de la pièce à la température d'austénitisation, et à la soumettre ensuite à un refroidissement énergétique, pour obtenir la transformation martensitique de la partie austénite. Il n'y a pas de matériau d'apport : la structure métallurgique superficielle du substrat est modifiée soit par des moyens thermiques (chauffage superficiel) soit par des moyens mécaniques. La trempe superficielle est un traitement thermique qui ne modifie pas la composition chimique de la couche de surface, comme c'est le cas par exemple pour la nitruration (profondeur de trempe par nitruration) ou encore pour la cémentation (profondeur de trempe par cémentation).

Profondeur de trempe / Déterminer la profondeur de trempe

La détermination de la profondeur de trempe (DS) selon les duretés de surface est définie dans la norme DIN EN 10328. La profondeur de trempe (profondeur de durcissement de la surface RHT) est la distance entre la surface de l'éprouvette et le point de couche sur lequel la dureté Vickers atteint la limite de 0,8 fois la valeur minimale de la dureté en surface, voir le graphique. La surface de l'éprouvette sur laquelle la mesure est réalisée doit être finement usinée.

Les empreintes de dureté sont disposées sur une ou plusieurs lignes perpendiculaires à la surface de l'éprouvette, d'une largeur définie par la norme. La force d'essais à appliquer est de 9,807 N (HV). À partir de cette courbe, qui représente la dureté en fonction de la distance par rapport à la surface, on obtient la profondeur de trempe en mesurant la distance de la surface à la limite de dureté calculée.

Durcissement par trempe

On chauffe superficiellement la peau du substrat par un moyen à haute énergie :

- Flamme.
- Induction électromagnétique
- Faisceau laser.
- Faisceau d'électron.
- Torche plasma.

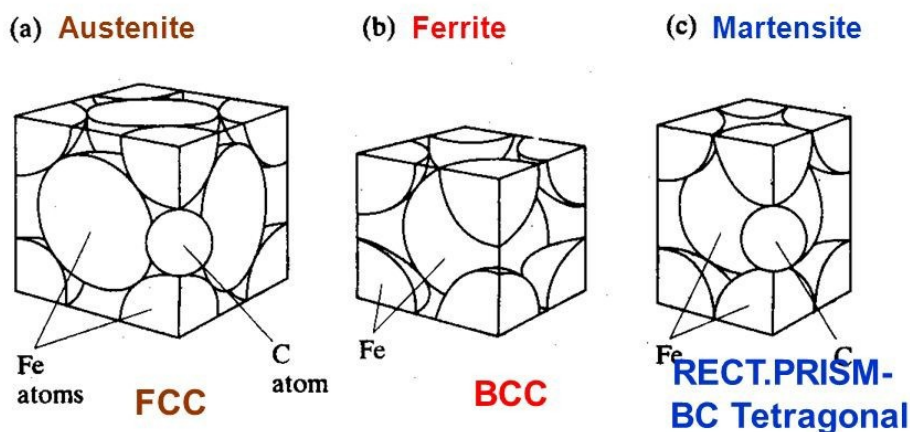
et on refroidit rapidement. Sur les alliages ferreux le chauffage superficiel doit provoquer la transformation allotropique et le refroidissement la transformation martensitique. Les profondeurs concernées vont du 1 /10ème mm à plusieurs mm.

Cycle thermique de trempe superficielle de l'acier

Les alliages fer-carbone (aciers, à l'exclusion des alliages dits austénitiques) ont la remarquable aptitude de durcir après un traitement comprenant un chauffage au dessus d'une température critique (comprise entre 750 et 1200°C, variable selon la composition) appelé austénitisation (opérant une transformation de la structure cristalline du fer de la forme α à la forme γ) suivi d'un refroidissement rapide o*ou trempe à une vitesse supérieure à une vitesse critique dite vitesse critique de trempe martensitique,

- . La structure obtenue après trempe est une martensite constituée
- Le temps d'interaction τ : c'est le temps duquel un élément de surface atteint les transformations structurelles.
- Le gradient thermique : le principe ne solution solide de fer α modifiée par sursaturation du carbone.

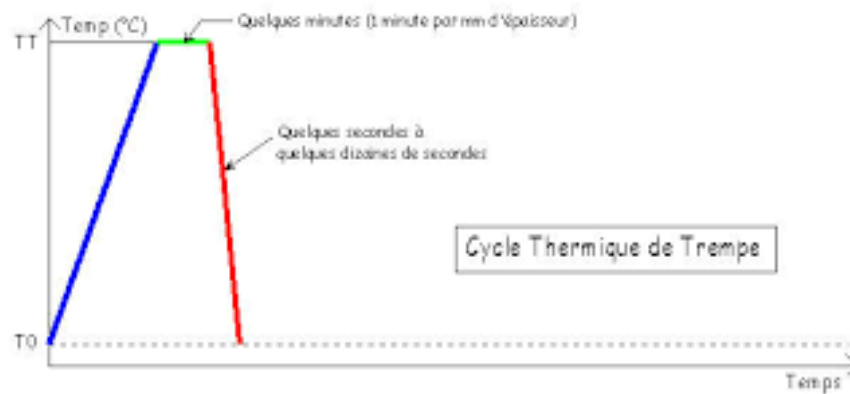
Unit cells



structure d'austénite, martensite, ferrite

Ce type de traitement peut être caractérisé par six paramètres principaux:

- L'intensité énergétique des faisceaux : il a une influence sur le profil de température ainsi que sur la profondeur de pénétration. même du traitement veut que la température maximale atteinte soit ou voisinage de la température de fusion (traitement en phase solide), ceci limite le temps d'interaction.
- Vitesse d'échauffement V_c .
- Vitesse de refroidissement V_r .
- La surface irradiée.



TREMPE

Avantages de la Trempe Superficielle

Durcissement Sélectif : Permet de durcir uniquement les zones nécessitant une résistance à l'usure, en laissant le noyau et les autres zones plus ductiles.

Flexibilité : Adaptable à une variété de formes et de tailles de pièces.

Économique : Moins coûteux que certains autres procédés de durcissement de surface tels que la cémentation ou la nitruration.

Rapidité : Le processus est rapide, ce qui permet de traiter les pièces en moins de temps par rapport à d'autres méthodes.

Applications de la Trempe

Engrenages : Durcissement des dents des engrenages pour une meilleure résistance à l'usure.

Arbres et Essieux : Amélioration de la durabilité des surfaces de contact.

Composants Aérospatiaux : Durcissement des pièces critiques sans affecter les propriétés de l'ensemble de la pièce.

Outils de Coupe : Renforcement des arêtes pour une meilleure performance de coupe et une durée de vie prolongée.

Moules et Matrices : Augmentation de la résistance à l'usure des surfaces fonctionnelles.

1.1. La trempe à la flamme

Définition

Le chauffage est assuré par des brûleurs alimentés par un mélange oxygène-gaz. Ce mode de traitement s'applique essentiellement aux très grandes ou grosses pièces mécaniques. Tous les aciers sont susceptibles d'être chauffés superficiellement, mais un certain nombre de critères détermine le choix des nuances à employer : On se limitera aux teneurs en carbone inférieures à 0,55 % de façon à ne pas s'exposer aux risques de tapure de trempe. On remarque d'ailleurs qu'au-delà de 0,55 % la dureté n'augmente plus sensiblement, Les éléments d'alliage permettent d'élever la pénétration de trempe. Lorsqu'on recherche des profondeurs plus importantes, on utilisera des aciers faiblement alliés.

*

Un chalumeau oxy-gaz (oxy – acétylénique, oxy – propane, oxy – méthane ...) permet de porter la surface à une température élevée diffusant la chaleur jusqu'à la profondeur recherchée. Les profondeurs élevées requièrent une régulation du gradient de chauffage pour éviter la surchauffe superficielle. Le chauffage s'effectue de proche en proche ou par chauffage généralisé (single-shot).

Étapes de la Trempe Superficielle par Flamme

Préparation :

Nettoyage : Les pièces à traiter doivent être nettoyées pour enlever toute trace de contaminants comme l'huile, la graisse, et les oxydes de surface.

Fixation : Les pièces peuvent être fixées ou maintenues en place pour assurer une chauffe uniforme

Chauffage :

Source de Chaleur : Utilisation d'une flamme oxy-combustible (souvent un mélange de gaz acétylène et d'oxygène) pour chauffer rapidement la surface du métal.

Température : La surface est chauffée à une température supérieure à la température critique de l'acier (typiquement entre 850°C et 950°C).

Uniformité : Il est crucial de maintenir un mouvement constant de la flamme pour obtenir un chauffage uniforme.

Trempe :

Refroidissement Rapide : Immédiatement après le chauffage, la surface est rapidement refroidie par un jet d'eau, d'huile ou d'air.

Formation de Martensite : Ce refroidissement rapide transforme l'austénite en martensite, une structure cristalline dure.

Post-Traitement (Facultatif) :

Revenu : Un revenu peut être appliqué pour soulager les contraintes internes et améliorer la ténacité sans trop réduire la dureté de la surface.

Inspection : Vérification de la dureté et de l'intégrité de la surface durcie

1.1.1. Traitements thermiques superficiels par induction

Définition

Le procédé de chauffage par induction s'effectue essentiellement à l'aide de générateurs à haute (supérieur à 100 kHz) ou moyenne fréquence (supérieure à 10 kHz). Il permet de développer dans la couche superficielle des pièces à traiter des densités de puissance maximales de l'ordre de 1 000 W/cm², à comparer aux 25 W/cm² d'un chauffage par rayonnement classique. Il en résulte des vitesses de montée en température relativement rapides et la possibilité d'évolutions structurales localisées



trempe par induction

Étapes du Traitement Thermique par Induction

Préparation :

Nettoyage : Les pièces doivent être nettoyées pour enlever toute contamination de surface.

Positionnement : Les pièces sont positionnées de manière à assurer un chauffage uniforme.

Chauffage par Induction :

Bobine d'Induction : Une bobine, souvent en forme de solénoïde, est placée autour ou à proximité de la zone à traiter.

Courant Alternatif : Un courant alternatif passe à travers la bobine, générant un champ électromagnétique oscillant.

Courants de Foucault : Ce champ induit des courants de Foucault dans la surface du métal, produisant de la chaleur par résistance électrique.

Température : La surface est chauffée à une température spécifique au-dessus de la température critique de l'acier (généralement entre 800°C et 1000°C).

Trempe :

Température : La surface est chauffée à une température au-dessus de la température critique de l'acier (typiquement entre 850°C et 1000°C), sans fondre le matériau de base.

2-Trempe :

Refroidissement Autocontrôlé : La surface chauffée est refroidie rapidement par conduction thermique dans le matériau non chauffé (sans besoin de média de trempe externe).

Formation de Martensite : Le refroidissement rapide transforme l'austénite en martensite, créant une couche durcie.

2. Les traitements thermochimiques

Définition

Les traitements thermochimiques sont des procédés de traitement de surface des matériaux métalliques qui combinent à la fois la chaleur et des réactions chimiques pour modifier les propriétés de la surface des pièces.

Ces procédés sont utilisés pour améliorer la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion, la dureté et d'autres caractéristiques de surface des matériaux métalliques.

Processus de traitement thermochimique :

Tout le traitement thermochimique comprend trois processus élémentaires :

- 1) Les processus qui ont lieu dans le milieu externe et entraînent la libération de l'élément diffusant dans un état atomique (ionique), par exemple, la dissociation de l'ammoniac avec la libération de l'hydrogène atomique ($2\text{NH}_3 \leftrightarrow 2\text{N} + 6\text{H}$) ou la décomposition du monoxyde de carbone pour produire du carbone atomique ($2\text{CO} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$).
- 2) Contact des atomes diffusants avec la surface à traiter et formation de liaisons chimiques avec les atomes de fer de la pièce en acier (adsorption).
- 3) Pénétration de l'élément saturant en profondeur dans le métal de base, c'est à dire, diffusion

Paramètres de traitement thermochimique :

La concentration de l'élément diffusée sur la surface dépend du potentiel du milieu environnant, qui assure un approvisionnement suffisant des atomes de cet élément à la surface, et de la vitesse de diffusion qui permet à ces atomes de pénétrer dans le métal.

-La profondeur de pénétration est déterminée par la vitesse qui, dans un cas particulier, dépend principalement de la température du procédé et de la concentration de l'élément diffusé à la surface.

-La quantité de substance (g) diffusée en temps unitaire (seconde) à travers la surface unitaire (cm²) à un gradient de concentration unitaire est appelée le coefficient de diffusion (D, cm²/ sec).

Plus la concentration de dispersion à la surface du métal est élevée, plus la couche diffuse profonde et toutes les autres conditions sont égales. Des températures plus élevées deviennent naturellement le taux de diffusion. Plus la température est élevée, plus la couche diffuse obtenue est profonde dans un intervalle de temps donné.

2.1. Les différents traitements thermochimiques

Voici quelques-uns des traitements thermochimiques les plus couramment utilisés :

2.1.1. Cémentation

Définition

La cémentation est un traitement thermochimique auquel est soumis un produit ferreux porté à l'état austénitique pour obtenir un enrichissement superficiel en carbone, élément qui se trouve alors en solution solide dans l'austénite. Le produit ferreux cémenté subit un durcissement par trempe immédiate ou ultérieure.

La surface des pièces est mise en contact avec un milieu susceptible de fournir du carbone libre par une réaction chimique à haute température ; la température de cémentation est choisie supérieure à la température Ac_3 de l'acier, et généralement comprise entre 900 et 1000° C, parce que la faible solubilité du carbone dans la ferrite implique que le traitement s'effectue dans le domaine austénitique. De plus, on peut ainsi, dans la plupart des cas, effectuer le traitement de durcissement par trempe martensitique directement à partir de la température de cémentation

Le but de ce double traitement, diffusion et durcissement par trempe, est d'obtenir à la surface de l'acier une couche de 0,3 à 2mm d'épaisseur à haute teneur en carbone (généralement comprise entre 0,60 et 0,90 %), ayant une structure essentiellement martensitique de grande dureté (pouvant atteindre 700 à 900 HV en surface), présentant des contraintes résiduelles de compression élevées, capable de résister à des sollicitations mécaniques sévères, et reposant sur un cœur ayant une dureté nettement moins élevée (inférieure ou égale à 400 HV environ) et présentant de bonnes caractéristiques de ténacité. Il vise aussi à l'obtention de pièces ne nécessitant pas ou peu de finition. Les différents paramètres métallurgiques sur lesquels il faut jouer pour obtenir ces résultats sont multiples.

Techniques de cémentation

La cémentation en caisse

Le principe de la cémentation en caisse est de noyer les pièces à traiter dans un ciment solide à base de charbon de bois, le tout étant maintenu dans une caisse fermée portée à la température de cémentation (900 °C et 950 ° C). Le ciment est constitué de carbone amorphe, généralement du charbon de bois (provenant de bois sélectionnés, exempts d'écorces) additionné d'un activateur, le carbonate de baryum $BaCO_3$. Il se présente soit

*

sous forme de granulés reconstitués à partir d'un mélange de charbon de bois (60 à 75 %) et de carbonate de baryum (25 à 40 %) en poudre. soit sous forme de morceaux de charbon de bois finement concassés enrobés de carbonate de baryum en présence d'un lait de chaux comme fixateur. En huit heures environ, on obtient une profondeur de cémentation pouvant atteindre 1,6 mm [4]. Les ciments solides sont des mélanges à bases de matière carbonées aptes à former les gaz ou les espèces carburantes (CO). La cémentation se fait en vase clos pour éviter que les gaz ne s'échappent, d'où le nom de cémentation en caisse donné à ce procédé, peu utilisé actuellement et réservé au traitement de grosses pièces ou de séries limitées,

La cémentation liquide

Les ciments liquides sont à bases de cyanures ou de ferro-cyanures fondus. Les pièces sont immergées dans le bain de sel fondu à la température choisie pour la réaction chimique et la diffusion. La cémentation en bain de sel permet un chauffage homogène et une action chimique régulière, sa mise en œuvre est simple et son coût d'investissement est faible, mais les sels de cyanure utilisés ont des effets polluants.

La cémentation gazeuse

On utilise soit le procédé à l'azote et méthanol, soit le procédé par générateur endothermique. Dans les deux cas, il se forme dans le four une atmosphère composée de monoxyde de carbone et d'hydrogène. L'opération s'effectue entre 900 °C et 950 °C et dure plusieurs heures,

Il s'agit là d'un procédé chimique de traitement superficiel, qui améliore la dureté de la pièce par diffusion de carbone aux couches superficielles, et qui améliore aussi la résistance à l'usure et à la fatigue. Les pièces de fabrication sont maintenues à une température élevée et sont mises en contact avec une atmosphère riche en carbone, de telle sorte que le carbone puisse se diffuser dans les couches superficielles de la pièce. Ce procédé est généralement réalisé dans un four de trempe sous atmosphère au sein duquel les pièces sont immédiatement trempées après le procédé de diffusion pour transformation martensitique.

Champ d'application :

- Pièces d'usinage contenant des éléments tels que : Cr, Mo, Ni, B.
- Les arbres, les portées de roulement à bille, les engrenages, les plaques d'usure.
- Aciers : 8620, 4320, 9310 et 17CrMo/ acier à faible teneur en carbone des petites pièces

les avantages de cémentation

- Augmentation de la dureté de surface.
- Résistance à la fatigue.
- Amélioration de la résistance à l'usure.
- Maintien de la ductilité du noyau.
- Possibilité de traitements postérieurs.
- Flexibilité des matériaux traités.
- Amélioration de la résistance à la corrosion .
- Application à des pièces de formes variées.
- Prolongation de la durée de vie des composants.
- Procédé établi et éprouvé.

a) Nitruration

Définition

La nitruration et la nitrocarburation sont les traitements de surface les plus employés pour les pièces en acier ferritique. Ces traitements impliquent une réaction de l'azote et du carbone dans les pièces à des températures de l'ordre de 570°C en limitant considérablement les distorsions thermiques des grandes pièces comparativement au traitement de cémentation (900°C) qui demeure limité aux pièces de petites dimensions. Les nitrurations conduisent dans le cas général à la formation de deux couches distinctes dite de « combinaison » et de « diffusion » qui régissent respectivement les propriétés superficielles (comportement tribologique et résistance à la corrosion) et les caractéristiques mécaniques en sous couche.

La couche de combinaison doit son nom au fait que l'azote est sous forme de nitrure, donc combiné. Elle est composée essentiellement des nitrures de fer ϵ ($\text{Fe}_2\text{-3N}$) et γ' (Fe_4N). la couche de diffusion : Dans le fer pur (ou l'acier non allié), l'azote qui diffuse en solution solide d'insertion conduit à un très faible durcissement selon l'enrichissement en azote. La solution solide est conservée si le métal est refroidi rapidement à partir de la température de nitruration. Si le refroidissement est lent ou si le métal est soumis à un revenu après trempe, des nitrures précipitent, conduisant à une seconde possibilité de durcissement par précipitation. En l'absence d'éléments d'alliage, ce durcissement n'excède pas 500 HV sur une profondeur très faible.

Principe général du traitement de nitruration

Le diagramme d'équilibre Fer-Azote de la figure montre, aux températures de traitement utilisé entre 450 et 580°C l'existence :

D'une solution solide α d'azote cubique dans le fer à très faible solubilité en azote.

Du nitrure γ' de structure cubique à face centrée dans laquelle un atome d'azote occupe le site octaédrique situé au centre de la maille. Ce nitrure est stable dans un domaine de composition qui, à 590°C, s'étend de 19 à 20.2 atomes % d'azote soit 5.5 à 5.75 % en masse. Sa dureté est d'environ 800 HV.

Du nitrure ϵ de structure hexagonale compacte de type $\text{Fe}_2\text{-3N}$, dont les sites Octaédriques sont occupés par des atomes d'azote variables selon la composition du nitrure. Ce nitrure est stable à partir de 24 atomes % à 570 °C soit, 7.35 % en masse. La limite d'existence du nitrure ϵ correspond à l'apparition du nitrure Fe_2N orthorhombique.

Procédés de nitruration

Nitrocarburation en bains de sels

Les bains de sels pour nitrocarburation sont composés principalement de cyanate et carbonate de métaux alcalins et de petite quantité de sulfure. La composition chimique du bain est maintenue dans les limites suivantes : Cyanate : 36 ± 2 % ; carbonate : 19 ± 2 % ; cyanide : environ 0.8 %. L'élément nitrurant est le cyanate CNO qui se décompose suivant une double réaction de dismutation et d'oxydation.

L'oxygène est apporté à la surface par l'air ambiant et par l'air comprimé introduit dans les bains. Il s'y ajoute une réaction de carburation par le monoxyde de carbone produit.

Nitruration gazeuse

L'élément de base de ce procédé est l'ammoniac qui réagit dans des conditions données de température et d'environnement (pièces, montages, surface...)

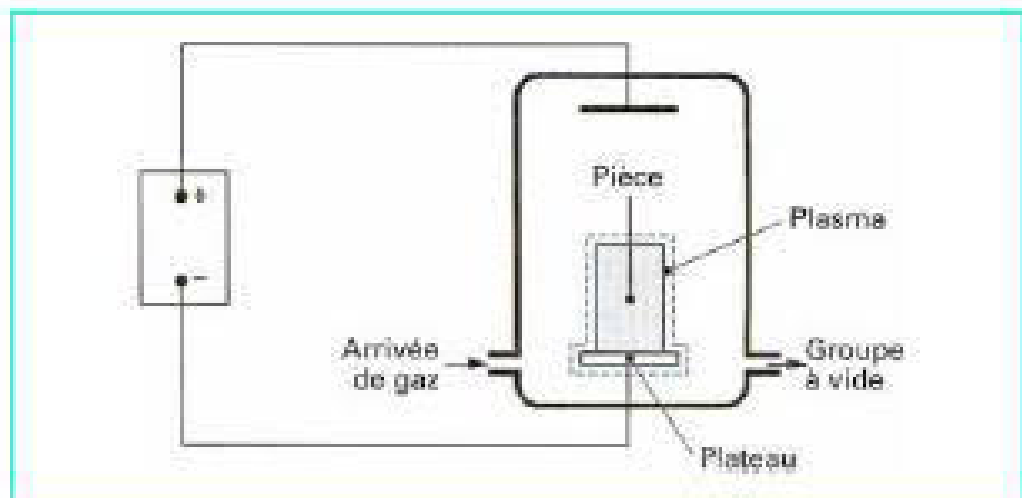
Une partie de l'azote naissant diffuse à la surface de l'acier, tandis qu'une autre partie est désorbée pour reconduire à la formation de la molécule N_2 . La diffusion d'azote dans le matériau dépend de la concentration locale en azote atomique.

La phase α étant très rapidement saturée en azote, les phases γ' ou ϵ apparaissent par nucléations localisées. Les phases γ' ou ϵ croissent tandis que l'azote continue à diffuser dans la structure de l'acier. La croissance γ' ou ϵ conduit à la formation de la couche de combinaison alors que celle-ci alimente la zone de diffusion Couche de combinaison / zone de diffusion

Nitruration ionique

Lorsqu'une différence de potentiel est imposée entre une anode et une cathode dans une atmosphère gazeuse sous faible pression, il se produit des collisions ionisantes électron / molécule et, au-delà d'un certain potentiel, un régime de décharge lumineuse s'établit avec production d'espèces ionisées au voisinage de la cathode

*



nituration ionique

Aciers pour nituration

Le choix d'un acier destiné à être nitruré doit être fait en fonction des caractéristiques recherchées sur la pièce et des conditions de réalisation de celle-ci.

Les critères de choix sont divisés en deux groupes :

- caractéristiques du cœur (résistance, trempabilité, tenue à chaud, soudabilité...),
- caractéristiques de la couche nitrurée, (dureté, fragilité, profondeur ...).
- il s'agit donc d'aciers trempés et revenus à une température supérieure à la température de nituration.

Aciers au carbone : XC 18 à XC 55,

Aciers au manganèse : 20 M5 - 35 M5 - 40 M6,

Aciers au chrome : 38 C4 - 42 C2,

Aciers au chrome molybdène : 25 CD4 à 42 CD4, 30 CD12,

Aciers au chrome -aluminium molybdène : 30 CAD6-12, 40 CAD6-12,

Aciers au nickel chrome molybdène : 30 CND8, 35 NCD16,

Aciers à outils : Z 38 CDV5 ; Z 100 CDV5 ; Z 160 CDV12 ; Aciers rapides,

Aciers à dispersoïdes.

Aciers inoxydables.

les avantages de nituration

Amélioration de la dureté de surface .

Augmentation de la résistance à la fatigue.

Amélioration de la résistance à la corrosion.

Réduction du frottement.

Stabilité dimensionnelle.

Compatibilité avec différents matériaux.

Amélioration de la résistance à la piqûre..

Pas de traitement de finition requis.

Glossaire



surface

c'est enveloppe exterieur de l'objet qui détermine son volume



Références



01

C.Leroux. « Les procédés de nitruration appliqué aux outillages de forges à chaud ». CETIM (1995).



