
CHAPITRE 5

TRAITEMENTS DE SURFACES

Contenu :

- ☞ *Traitement par voie mécanique*
- ☞ *Traitement par voie thermique*
- ☞ *Traitement par voie thermochimique*

Plan du cours

Objectifs généraux

- ☞ *Etablir un processus expérimental de traitement de surface;*
- ☞ *Choisir le traitement de surface qui convient, ses paramètres et le mode opératoire, pour répondre à une exigence industrielle donnée.*

Objectifs spécifiques

- ☞ *Connaître l'intérêt et les différentes voies des traitements de surface;*
- ☞ *Identifier et savoir choisir les paramètres et le mode opératoire des traitements de surface;*
- ☞ *Evaluer l'influence des traitements de surface sur les caractéristiques mécaniques des nuances traitées;*

Déroulement

Le chapitre sera abordé durant 4 séances de 1h:30min qui sera réparties comme suit :

- ☞ *Première séance : Classification et les traitements par voie mécanique;*
- ☞ *Deuxième séance : Les traitements par voie thermiques & thermochimique;*
- ☞ *Quatrième séance : correction de l'application de synthèse.*

Prérequis

- ☞ *Etude des diagrammes des phases à l'équilibre*
- ☞ *Les traitements thermiques dans la masse*
- ☞ *Notion de chimie minérale*

Evaluation

Réussir plus de 70% de l'application de synthèse et éventuellement des TD proposés

Sommaire

Introduction	85
1. Classification des procédés de traitements superficiels	85
2. Les traitements de surface par voies mécanique	87
2.1. Principe et intérêt industriel	87
2.2. Le traitement de galetage et de brunissage	87
2.3. Les traitements de grenailage	88
2.4. Les traitements de martelage	88
3. Les traitements de surface par voie thermique	89
3.1. Principe et intérêt industriel	89
3.2. Influence sur le profil des duretés superficielles	89
4. Les traitements thermiques par voie thermochimique	90
4.1. Principe et intérêt industriel	90
4.2. Nitruration	91
4.3. Carburation	91
4.4. Cémentation	92
5. Application de synthèse	95

Introduction

Les traitements thermiques dans la masse améliorent les propriétés mécaniques des aciers, mais ils s'accompagnent d'une diminution de leur ténacité. Or, pour de nombreuses utilisations, ce sont surtout les propriétés des surfaces qui sont importantes (dureté superficielle et résistances à l'usure, par exemple). Dans ces cas, il est donc préférable de ne traiter que la surface de la pièce, afin que son cœur, de résistance moyenne, conserve une bonne ténacité.

Les traitements thermiques superficiels des pièces en alliages ferreux sont destinés à améliorer leur résistance à la fatigue ou (et) à l'usure en durcissant les zones critiques superficielles par des apports thermiques suffisamment brefs et localisés pour confiner les effets structuraux. Les cycles thermiques associés visent soit un chauffage rapide localisé d'austénitisation en phase solide suivi de trempe naturelle ou forcée, soit une refusions superficielle suivie du refroidissement permettant l'évolution structurale désirée

À côté de ces traitements par seul apport thermique, se développent aussi des traitements avec refusions superficielle en présence d'un matériau d'apport sous forme de pré-dépôt ou poudre projetée : simple enrichissement, recouvrement par un nouvel alliage, inoculation de particules dures ou réfractaires. Nous n'aborderons dans le présent article que la famille de traitements sans matériau d'apport, en nous attachant essentiellement au durcissement en phase solide des aciers.

Le résultat est une modification de la constitution physico-chimique d'une zone superficielle de faible épaisseur de quelques dizaines de micromètres à quelques millimètres tout en préservant les propriétés de la zone centrale. On distingue dans la pratique, deux types de traitement de surface : les trempes superficielles, appliquées uniquement à la surface des pièces, et les traitements thermochimiques, qui modifient la composition de la surface. Dans les deux cas toutefois, la pièce traitée est hétérogène, car, entre le cœur et la surface, il s'établit un gradient de structure et de propriétés.

1. Classification des procédés de traitements superficiels

Les pièces pour lesquelles on effectue de tels traitements sont aussi nombreuses que variées : arbre de torsion, dents d'engrenages et de pignons, surfaces de glissement, etc. En conséquence, les traitements thermiques superficiels consistent dans l'obtention d'une dureté élevée en surface jointe à une ténacité et une ductilité importantes au cœur d'une pièce en acier.

Tab. 1. Récapitulation et classification des traitements superficiels

Les traitements de surface		
Par voie mécanique	Par voie thermique	Par voie chimique
- Martelage	- Trempe avec transformation de phase	- Cémentation
- Grenailage	- Trempe avec transformation de phase	- Nitruration
- Galetage	- Trempe superficielle	- Carbonituration
- Usinage	- Dépôt par Evaporation-Condensation (PVD, CVD)	- etc.
- Etc.	- Etc.	

Ces différents procédés des traitements superficiels doivent apporté des modifications structurales sur les couches superficielles de la surface traitée. Les principales modifications successibles peuvent être décrites sommairement comme suit :

- *Traitement thermique localisé concernant : durcissement par la trempe après le chauffage superficiel*
- *Traitement thermochimique de diffusion d'un élément chimique d'alliage par le contact avec milieu adapté concernant :*
 - *Nitruration : diffusion d'azote ;*
 - *Sulfonitruration : diffusion simultanée d'azote et de soufre*
 - *Chromisation : diffusion de chrome. etc.*
- *Traitement thermochimique par diffusion d'un ou plusieurs éléments suivis d'un traitement thermique affectant la zone modifiée concernant*
 - *Cémentation : diffusion de carbone suivie d'un durcissement par trempe*
 - *Carbonitruration : diffusion simultanée d'azote et de carbone suivie d'un durcissement par trempe.*
- *Traitements de surface par voie mécanique concernant :*
 - *Grenaillage ;*
 - *martelage ;*
 - *Galetage. etc.*

Le développement des traitements de revêtement de surface est d'un domaine prioritaire dans la mise en œuvre des matériaux, avec pour objectifs l'amélioration de la résistance aux sollicitations extérieures imposées en service et qui sont des phénomènes de surface telles que : la résistance à la corrosion simple ou sous contraintes, la résistance à l'usure, à la fatigue ou encore de l'aspect esthétique.

2. Les traitements de surface par voies mécanique

2.1. Principe et intérêt industriel

L'action mécanique sur une surface se traduit par la réalisation d'un cycle de chargement élastoplastique local, alors que le reste du matériau demeure élastique. Cette action mécanique engendre des déformations plastiques localisées en surface se qui engendre un écrouissage superficiel de la pièce traitée. L'action mécanique responsable au durcissement de la surface traitée par voie mécanique est généralement imposée soit par contact, cas de galetage, de brunissage, de polissage ; soit par choc comme le cas de grenaillage.

2.2. Le traitement de galetage et de brunissage

La couche superficielle est déformée plastiquement en utilisant des galets avec ou sans déplacement. On fait rouler sur la surface un galet sous une forte charge qui provoque une plastification (pression de Hertz) et donc de contrainte de compression.

Le galetage est très utilisé pour le traitement de congés de raccordement, en particulier sur des vilebrequins et ceci dont le but est d'augmenter la résistance à la fatigue de contact et obtenir des durées de vie supérieures à 10^9 cycles. La figure 3.1 montre les différents types de galetage. Le galetage est un procédé particulier de brunissage, il est souvent appelé brunissage à galet. Les améliorations apportées à une surface traitées sont également semblables à celle engendrées par galetage.

Le galetage conduit à un très bon état microgéométrique de la surface. Les contraintes de compression se situent dans une épaisseur pouvant atteindre 2 à 3 mm si les dimensions de la pièce le permettant.

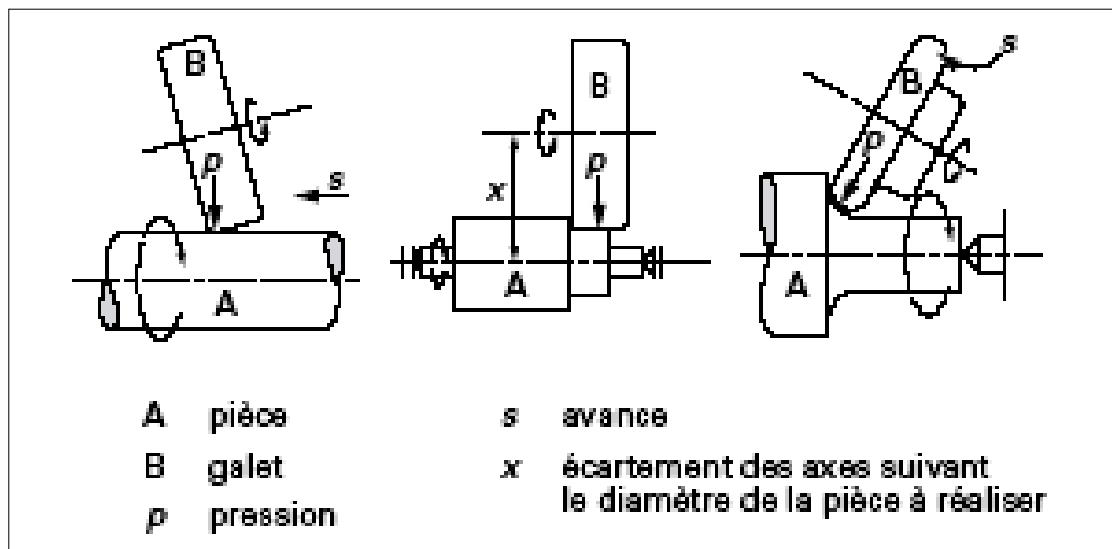


Fig. 2. Schéma de différents types de galetage

2.3. Les traitements de grenailage

Le grenailage est un procédé de traitement superficiel par voie mécanique qui consiste à bombarder les surfaces à traiter à l'aide de billes de petit diamètre à une grande vitesse. Les principales modifications des surfaces traitées réside essentiellement dans le durcissement par choc mécanique des couches superficielles et altère, en conséquence, la rugosité de la surface.

2.4. Les traitements de martelage

Le martelage est réalisé par un pistolet à percussion qui projette sur la pièce une tige à bout hémisphérique du diamètre 6 à 8mm, donc de dimensions nettement plus importante que le cas du grenailage. Le martelage provoque une profondeur de traitement plus importante que le cas de grenailage.

Un grenailage bien adapté à l'état de surface et au matériau permettre de diminuer, ou même de supprimer, les micro-concentrations des microfissures engendrées par les rayures d'usinage. Le tableau ci-dessous récapitule les techniques de mise en œuvre, l'apport sur la profondeur de traitement et les principaux avantages et inconvénients des principaux traitements de surface par voie mécanique.

Tableau 3.2 : Récapitulation des traitements superficiels par voie mécanique

Dénomination	Mise en forme	Profondeur de traitement	Avantages et inconvénients
Tribo-finition	Frottement	De 0.01 à 0.03 mm	Long et coûteux à réaliser
Martelage	Impact d'aiguilles à extrémité sphérique	De 1 à 2mm	Problème d'état de surface, ne s'applique qu'aux géométries simples
Grenailage	Projection contrôlée de bielles de différents diamètres, de différentes matières et de différentes vitesses	De 0.1 à 0.6mm suivant le matériau et les conditions	Quelques problèmes d'incrustation, de microdéfauts et parfois de rugosité. S'adapte à toutes les géométries
Brunissage et Galetage	Glissement d'un brunissoir et roulement ou d'un galet avec une forte pression	De 2 à 3 mm	Variation dimensionnelle, nécessite une géométrie particulière

3. Les traitements de surface par voie thermique

3.1. Principe et intérêt industriel

Les traitements thermiques superficiels industriels de durcissement et de mise en compression simultanée ne concernent pratiquement que les alliages ferreux et l'exposé qui suit se limite à cette catégorie de matériaux. On peut les classer métallurgiquement en deux catégories principales :

- ☞ Les traitements qui mettent à profit la transformation de l'austénite, essentiellement en martensite ;
- ☞ Les traitements qui conduisent à la formation de précipités durcissant, essentiellement des carbures et des carbonitrides.

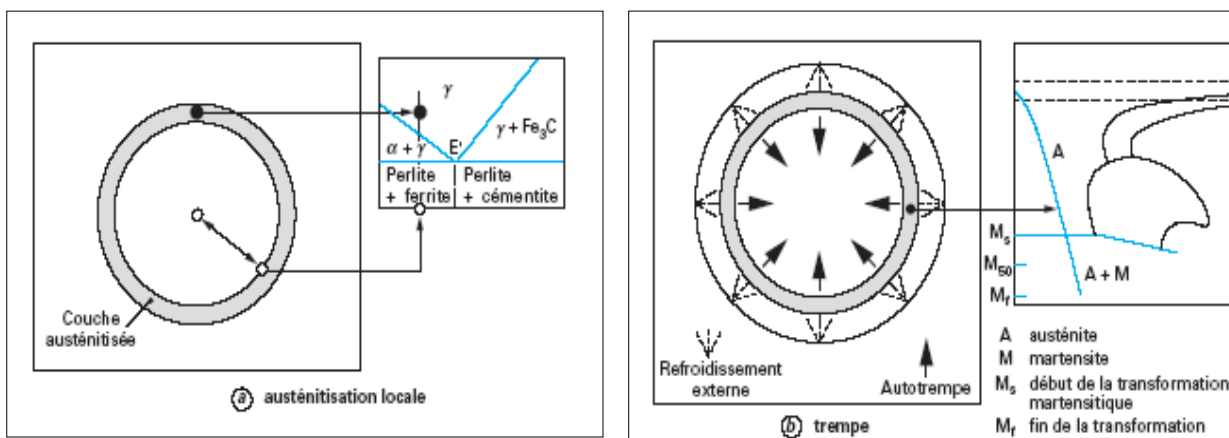


Fig. 3. Durcissement superficiel par trempe après chauffage localisé

3.2. Influence sur le profil des duretés superficielles

En vous donne trois traitements superficiels de la même nuance pour des temps de maintien et de préchauffages différents, suivis de trempe à l'eau pendant 8 secondes. Soient :

- La pièce A : temps de préchauffage : 7 s ; temps de maintien 10 s
- La pièce B : temps de préchauffage : 6.5 s ; temps de maintien 5 s
- La pièce C : temps de préchauffage : 4.85 s ; temps de maintien 1.35 s

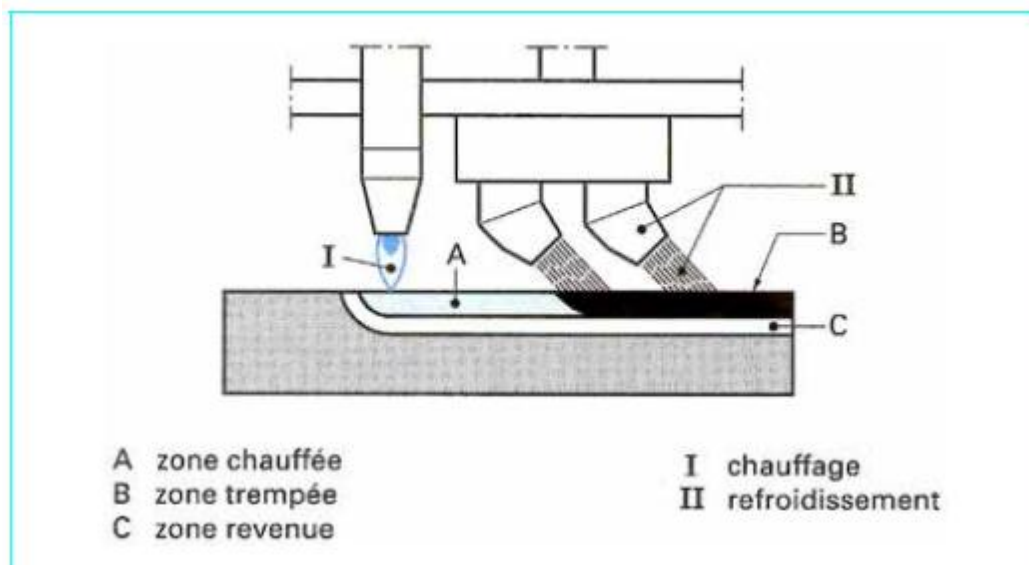


Fig. 4. Trempe superficielle par induction défilé d'un arbre à came

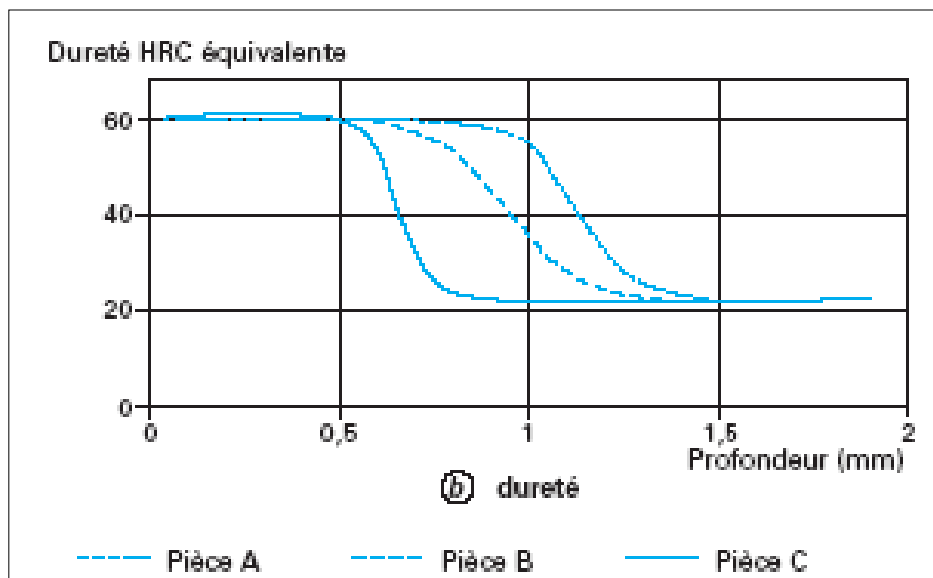


Fig. 5. Profils des duretés dans une dent de pignon en acier SAE 1552 après durcissement par trempe localisée après chauffage par induction

Il est à noter qu'une épaisseur trop élevée de la couche austénitisée risque de conduire à un état de contraintes résiduelles de traction dans les couches traitées. On se rapproche, en effet dans ce cas, d'une opération de durcissement dans la masse.

4. Les traitements thermiques par voie thermo-chimique

4.1. Principe et intérêt industriel

La maîtrise des traitements thermo-chimiques suppose la connaissance de quelques données fondamentales présentant le double intérêt de :

- Permettre de comprendre les phénomènes mis en jeu afin de les gérer (ce qui sera particulièrement efficace dans la mise au point des procédés de contrôle) ;

— Rendre possible la modélisation de ces phénomènes afin de développer des méthodes ou des outils logiciels de contrôle de processus.

Les modes de durcissement localisés des aciers et, par extension, des fontes, sans étroitement liés aux mécanismes physiques de diffusion de l'élément diffusant et cela en descendant jusqu'à l'échelle atomique car c'est à ce niveau que peuvent s'expliquer certains mécanismes fondamentaux de durcissement.

Les traitements thermochimiques consistent essentiellement à enrichir les couches superficielles des nuances à traiter par un élément diffusant en élément d'insertion puis un traitement de trempe superficielle pour le cas de cémentation (diffusion de carbone) et de carbonituration (diffusion de l'azote et de carbone).

4.2. Nitruration

La nitruration est un procédé conduisant à l'obtention d'un durcissement superficiel par la diffusion d'azote. La solubilité de l'azote dans le fer est de 0.4% à 590°C ; on effectue sa mise en solution dans le domaine α , entre 500 et 575°C. Avant de saturer le fer, l'azote forme des nitrures finement dispersées ; on choisit une température relativement basse afin d'éviter une diffusion à cœur et de contrer la coalescence des nitrures, qui empêchent le durcissement. La nitruration de la couche superficielle d'une pièce peut s'exécuter en contact.

- Avec un milieu liquide (bains de sels fondus) ;
- Avec un milieu solide (poudres) ;
- Avec un milieu gazeux (où l'azote est actif à l'état atomique) ;
- Avec un milieu de plasma (où l'azote est actif à l'état d'ions dans un plasma, nitruration ionique).

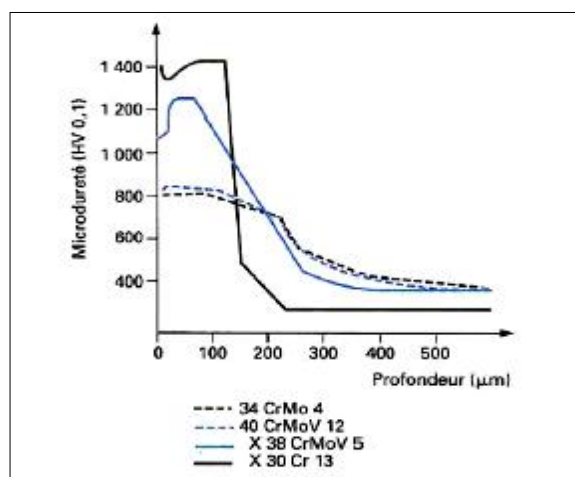


Fig. 6. Influence de la teneur en carbone sur le profil de microstructure après 32h à 560°C

4.3. Chromisation

Le procédé consiste dans la diffusion de chrome en milieu pulvérulent à une température supérieure à AC_3 . La diffusion produit sur les aciers à bas carbone une couche superficielle de faible dureté (alliages Fe-Cr) résistant à la corrosion et sur les aciers carburés une couche superficielle de très grande dureté / 1600 HV/ résistant à la corrosion et à l'usure.

4.4. Carburation

Ce traitement superficiel a pour but initial d'augmenter la dureté superficielle de pièces en acier de teneur en carbone comprise entre

0,1 et 0,2 %. Ces teneurs relativement faibles permettent d'obtenir des niveaux de ductilité et de ténacité à cœur garantissant une sécurité d'emploi suffisante.

Le traitement comprend une étape d'**enrichissement en carbone** d'une couche superficielle de la pièce portée dans le domaine austénitique, suivie d'une étape de **refroidissement rapide par trempe**. La figure 3.5 montre la séquence simplifiée des opérations et des transformations, en relation avec un diagramme de constitution à l'équilibre et un diagramme TRC.

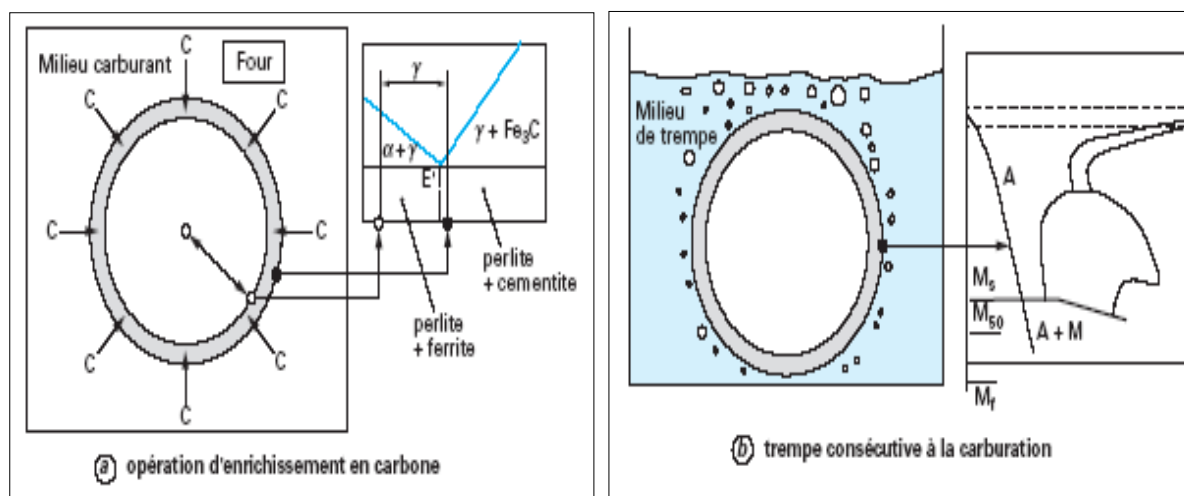


Fig. 7. Schéma simplifié du traitement de carburation – trempe des aciers

4.5. Cémentation

Le traitement de cémentation appliqué aux aciers est un traitement thermo-chimique superficiel d'enrichissement en carbone réalisé en phase austénitique (généralement 900 à 980 °C). Il est destiné à obtenir après refroidissement un durcissement superficiel par trempe.

La recherche d'une dureté maximale conduit à obtenir des teneurs superficielles en carbone comprises entre 0,7 et 0,9 % de carbone. Appliquée sur un acier à faible teneur en carbone, la cémentation est un moyen de durcissement superficiel permettant d'assurer une forte mise en précontrainte de compression de la surface et une bonne résistance à l'usure grâce à l'obtention d'une martensite à haute teneur en carbone, tout en garantissant à cœur une bonne ductilité grâce à l'obtention d'une martensite à bas carbone. Les fortes profondeurs seront réservées aux pièces de mécanique lourde, les profondeurs les plus courantes variant de 0,3 à 2,5 mm.

La couche cémentée, d'épaisseur relativement faible, est équivalente à une « austénite » de teneur en carbone continûment variable de C_s à C_o . Le comportement de cette « austénite à gradient de teneur en carbone » est très complexe. À chaque point de la pièce correspond un diagramme TRC (figure 7.b).

Une couche traitée est caractérisée par son profil de microdureté mesuré sur l'échelle Vickers. Il permet de mesurer l'épaisseur efficace de la couche, appelée « profondeur conventionnelle de cémentation ». Elle est définie par la distance à la surface du point pour lequel la dureté a une valeur égale à 550 HV (figure 7.c).

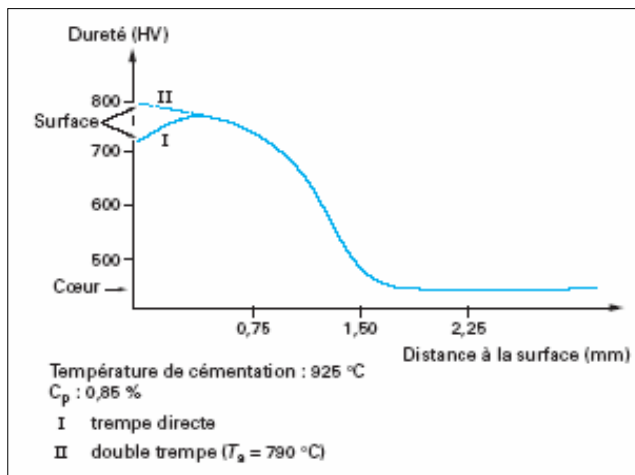


Fig 8. Profils de dureté d'une couche cémentée d'une pièce en acier 16NiCrMo13, après trempe

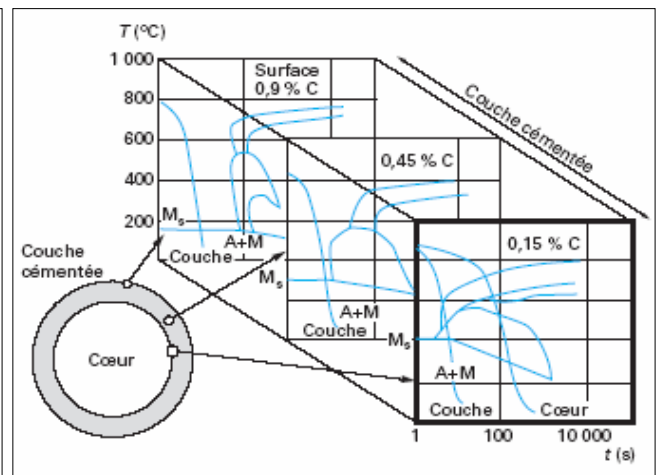


Fig 9. Diagramme TRC, évolution en fonction de la profondeur d'une couche cémentée

Applications

- Décrire l'évolution du tracé du diagramme TRC en fonction de la profondeur et de la teneur en carbone ;
- Décrire l'évolution de la dureté en fonction de la profondeur des couches cémentées et trempées de la nuance 16NiCrMo13 ;
- Déduire la profondeur du traitement de cémentation.

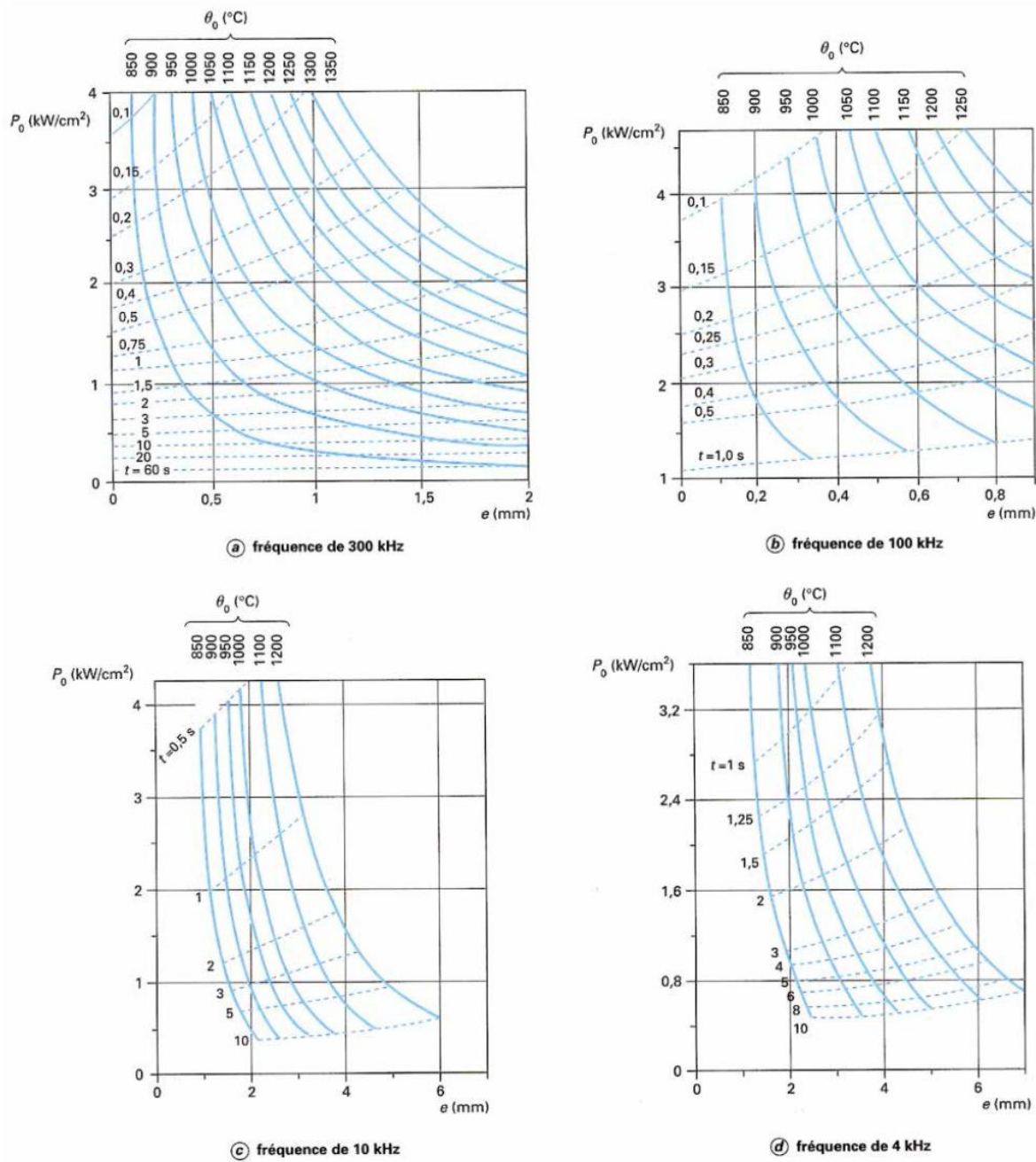
Conclusion

Dans la plupart des cas, une mauvaise préparation de surface est l'origine d'un traitement de surface défailant, mais sa situation très en amont dans la chronologie de la gamme de traitement rend parfois difficile l'identification de la culpabilité.

La qualité d'une préparation est une notion relative. Selon les utilisations, ni les éléments gênants ni leur teneur limite ne sont les mêmes.

Comme par ailleurs, une préparation de qualité « excessive » entraînera des surcoûts inutiles, la gamme de préparation de surfaces devra donc être adaptée au problème et le suivi (composition, température, durée, etc.) assuré avec autant de soins qu'il est nécessaire. Enfin, un bon état de surface est une qualité transitoire. On veillera tout particulièrement aux conditions de stockage des pièces préparées si on ne peut éviter celui-ci.

Annexe des traitements thermiques superficiels



θ_0 température de peau
 P_0 puissance surfacique
 e épaisseur d'acier portée à plus de 800 °C
 t temps de chauffage

Fig. 10. Abaqués de calcul du temps de chauffage et de la puissance surfacique nécessaire en fonction de l'épaisseur à durcir et de la température de surface tolérée pour une trempe superficielle par induction à 300 ; 100 ; 10 et 4 kHz

5. Application de synthèse

Les principaux traitements de surface, avec ou sans changement de la composition de la couche superficielle des pièces en alliages ferreux, permettent d'améliorer les propriétés fonctionnelles de ces couches en vue de mieux résister aux sollicitations de contact imposées en service.

L'une de ces caractéristiques à caractère superficiel est la résistance à l'usure qui s'améliore par augmentation de la dureté, de plus la résistance à la fatigue et à la corrosion sous contraintes sont aussi des phénomènes de surface gouvernés et améliorés par la génération de contraintes résiduelles de compression. Les deux effets sont attribuables à la localisation dans une couche superficielle de la formation d'une phase dure avec augmentation du volume et ceci, soit par transformation martensitique, soit par précipitation.

La présente application a pour objet de décrire les principaux objectifs et d'évaluer les résultats expérimentaux de quelques exemples typiques de traitements superficiels.

1°) Décrire les principaux objectifs de cémentation, de trempe superficielle et de nitruration. Quelle différence significative, sur le plan d'exécution, pouvez-vous les relevés entre ces traitements ?

.....

.....

.....

.....

.....

2°) Etude de l'apport de trempe superficielle sur les propriétés des couches superficielles d'un arbre cannelé de boîte de vitesse figure 1.

a) Déterminer l'épaisseur de la couche affectée par la trempe superficielle

.....

.....

b) Quelles sont les duretés en surface et au cœur de cet arbre ;

.....

.....

c) Déduire le taux de durcissement correspondant ;

.....

.....

d) A quoi est imputé le niveau de durcissement en surface traitée ?

.....

.....

3°) Le gradient de dureté et de structure entre la couche superficielle et le cœur de cet arbre conduit à gradient de propriétés : couche superficielle fragile et cœur tenace ; expliquer pour quoi en recherche cette configuration spécifique de propriétés pour les arbres cannelés de boîte de vitesses ?

.....

.....

.....

4°) Apport du traitement de cémentation, figure 2 :

a) Quelle est l'influence du temps de cémentation sur la profondeur de pénétration sous la surface traitée ?

.....

b) Déterminer le taux d'augmentation de l'épaisseur de cémentation si en augmentant la durée de carburation de 4 à 15 heures.

.....

5°) Apport du traitement de nitruration, figures 3 et 4 :

a) Déterminer la profondeur de nitruration conventionnelle Z_n ;

.....

b) Déterminer le niveau de dureté en surface ;

.....

c) Calculer le taux de durcissement correspondant ;

.....

d) Interpréter la répartition des contraintes résiduelles sur la figure 4 ;

.....

e) Dédire pour chacun des instant t_1 et t_2 les épaisseurs de la couche affectée par le traitement de nitruration ;

.....

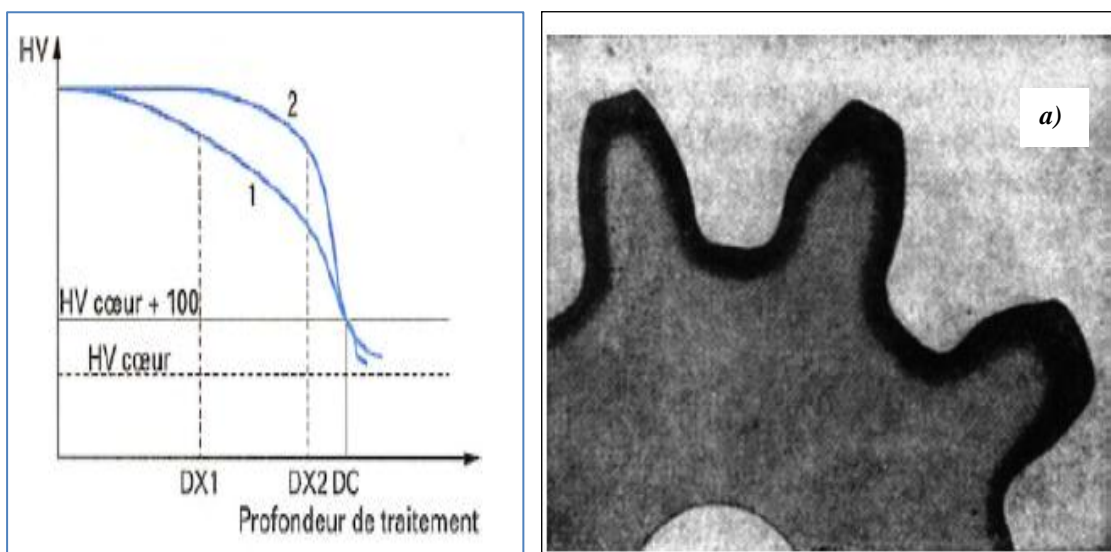


Fig. 1. a) Influence d'une trempe superficielle par induction sur un arbre canulé de boîte de vitesses. Les zones sombres superficielles ont une structure martensitique. b) Profil de dureté (de la surface vers le centre)