

Four pour la cémentation profonde basse pression

Sylvain Bissel, Fours Industriels BMI, France

La cémentation est un traitement thermo-chimique qui vise à augmenter la dureté superficielle en diffusant du carbone dans la pièce traitée et en la trempant. Leur résistance à l'usure par frottement, aux impacts et à la fatigue est alors améliorée. Selon l'application, la profondeur efficace de cémentation doit être adaptée. Les pièces de grande taille soumises à de fortes charges, telles que dans l'industrie minière ou les éoliennes, sont soumises à de fortes pressions de contact. Par conséquent, elles nécessitent des profondeurs de cémentation supérieures à la profondeur affectée par ces pressions de contact.

La cémentation profonde consiste en des profondeurs de cémentation allant de 2,5 mm à plus de 4 mm. Le présent travail montre les résultats de la cémentation basse pression profonde réalisée dans nos fours de trempes à l'huile sous vide avec le procédé multi-boost à l'acétylène ALLCARB®, y compris le four vertical de trempes à l'huile sous vide V64THC adapté aux pièces de très grandes dimensions.

1. Cémentation sous vide

1.1. Traitement thermique sous vide

Le traitement thermique sous vide présente de nombreux avantages par rapport à un traitement thermique sous atmosphère. Chaque cycle de traitement, quel que soit le four et le procédé, commence par une purge par le vide à 0,1 mbar au minimum. Ce vide permet de s'assurer que tout oxygène, humidité et autres contamination extérieur sera supprimé de l'enceinte.

Ainsi, l'oxydation agressive des pièces, constatée lors des traitements thermiques en bain de sel ou en four atmosphérique notamment, n'a pas lieu. Les pièces cémentées présentent un aspect gris légèrement mat.

1.2. Types de cémentation

La cémentation est généralement réalisée sur des aciers à faible teneur en carbone et faiblement alliés, voire non alliés.

La température de cémentation est réglée de manière à ce que l'acier soit en phase austénitique. En effet, le carbone est plus soluble dans l'austénite que dans la ferrite. Les différents procédés de cémentation peuvent être classés selon la manière dont le carbone est introduit dans les pièces.

Pour la cémentation par enrichissement gazeux, on distingue :

- La cémentation sous atmosphère, qui est effectuée dans un four à atmosphère contrôlée.
- La cémentation basse pression, qui est effectuée dans un four sous vide avec une pression de gaz de cémentation de quelques millibars.

Il existe, de manière plus marginale, de la cémentation plasma ou de la carbonituration par bain de sel.

Le tableau 1 résume les arguments pour une comparaison entre la cémentation en atmosphère et la cémentation sous vide^[1]. Tout en consommant moins de gaz et d'énergie électrique, la cémentation sous vide présente des avantages en termes de performance. L'utilisation de basses pressions rend les surfaces métalliques plus réactives.

De plus, l'acétylène (C_2H_2), utilisé dans ce travail comme gaz de cémentation, ne contient pas d'oxygène. L'oxydation indésirable et le désalliage des pièces traitées sont donc évités. De plus, dans le cas rare où les pièces sont fortement alliées, la pression de cémentation ainsi qu'une pression partielle en azote lors des phases de diffusions permet d'empêcher toute sublimation des éléments d'alliages sensibles.

1.3. Cémentation basse pression à l'acétylène

Au contact de l'acier à haute température, l'acétylène se dissocie en carbone et en hydrogène^[2]. Le carbone résultant réagit avec le fer des pièces en acier et forme des carbures. Il est ensuite diffusé dans la matrice de l'acier (figure 1).

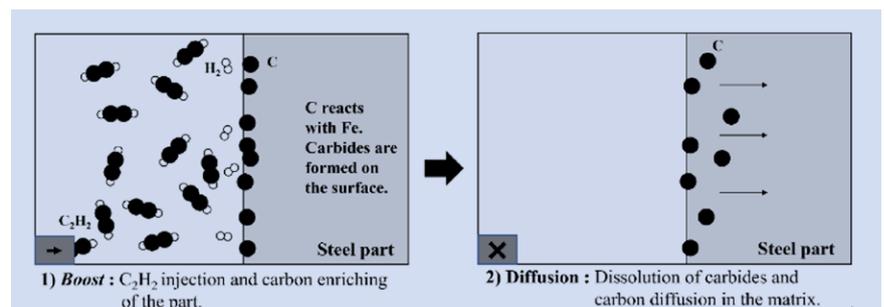


FIGURE 1 : Représentation schématique de l'enrichissement en carbone et de la diffusion lors de la cémentation basse pression avec de l'acétylène.

Critère	Cémentation atmosphérique	Cémentation basse pression
Intervalle de température (°C)	790-980	790-1100
Uniformité de cémentation ^(a) (mm)	± 0.25	± 0.05
Contrôle du transfert de carbone	Oui	Indirecte
Densité de la charge ^(b) (kg/m ³)	45-70	22.5-45 (pour trempe gaz) ^(c)
Temps de cémentation (min)	X minutes	X minutes minus 10-20%
Carbonituration	Addition de NH ₃	Addition de NH ₃
Microstructure	Acceptable (dans la plupart des cas)	Optimale (dans la plupart des cas)
Oxydation interne (µm)	7-13 (commun)	Aucune
Carbures	Suppression difficile	Suppression possible
Désalliage	Oui ^(d)	Non
Décarburation	Possible	Non
Diffusion d'hydrogène	Oui (à haute température)	Légère
Température de la double peau (°C)	> 65	<< 65
Impact environnemental direct	Faible	Emission de CO/NO _x
Consommation électrique	Faible (~ 30%)	Très faible (< 30%)
Consommation de gaz	Importante (x m ³ /h)	Faible (3 à 6 fois moins)
Investissement	Moyen	Important

(a) Les processus de cémentation en atmosphère et sous vide diffèrent généralement en ce qui concerne le moment où les additions de gaz sont introduites. Cela a le plus grand impact sur l'uniformité de la couche. Dans la cémentation en atmosphère, le gaz enrichissant est généralement ajouté après le rétablissement du point de consigne du four. Selon la masse et la configuration de la charge de travail, un différentiel de température important peut exister entre différents endroits de la charge de travail. Dans le cas de la cémentation sous vide, une période de stabilisation est intégrée au cycle pour permettre à la charge de travail d'atteindre la température de cémentation avant les additions de gaz

b) La densité de charge dans l'équipement de cémentation sous vide est souvent limitée en raison de l'utilisation de chambres de trempe à haute pression de gaz.

c) Dans cet article, les fours BMI utilisent la trempe à l'huile et ne sont pas concernés par cette limitation.

d) En raison de l'oxydation à la surface de la pièce.

Tableau 1 : Comparaison entre cémentation en atmosphère et basse pression^[1]

DESIGN & MANUFACTURING

YOUR ONE STOP SOLUTION FOR HEAT TREATMENT
FIXTURES AND FURNACE SPARE PARTS



Shinning Alloy focus on **standard and customized** heat treatment fixtures and furnace spare parts. By working with us you will benefit from our cost-effective solution: from DESIGN to production and finally on-time delivery

**SHINNING
ALLOY**
Furnace Fixtures & Spare Parts



Figure 2 : Four vertical de trempe à l'huile sous vide de la famille V6_THC de BMI

Basée sur cette alternance de génération de carbures et de diffusion du carbone, la cémentation sous vide consiste en deux étapes réalisées une seule fois (mono-boost) ou répétées (multi-boost) :

- Boost : injection de gaz pour enrichir les surfaces des pièces en carbone. Dans cet article, le gaz utilisé est l'acétylène (C_2H_2).
- Diffusion : diffusion du carbone de la surface vers le cœur des pièces traitées (aucune injection de gaz pendant cette étape).

L'avantage du séquençage multi-boost réside dans la possibilité d'apporter uniquement la quantité nécessaire de carbone pour cémenter la pièce à chaque séquence. Cela permet d'optimiser la consommation de gaz de cémentation et d'éviter la saturation en carbone et le dépôt de suie sur les pièces traitées.

2. Four vertical de trempe huile sous vide type V6_THC

2.1 Présentation

La famille V6_TH est composée des fours verticaux bi-chambres de trempe à l'huile sous vide, conçus pour le traitement de grandes charges à l'image de trains d'aterrissage, de composants hydrauliques et d'outillage pour les engins de travaux publics. La chambre de chauffe peut être maintenue à une température définie entre les traitements. La mobilité de chambre de chauffe permet le chargement de pièces volumineuses au-dessus de la chambre de trempe par pont roulant. La porte étanche à l'intérieur garantit une interaction nulle avec les vapeurs d'huile, ce qui aide à atteindre des niveaux de vide élevés.

Lorsqu'ils sont équipés de l'option ALLCARB® pour la cémentation basse pression, ces fours sont nommés V6_THC (figure 2).

2.2. Chambre de chauffe

La chambre de chauffe est composée d'une enceinte chaudronnée en double paroi refroidie à l'eau. Le traitement thermique est réalisé dans une chambre composée d'une ossature en acier, d'une isolation thermique en laine minérale ou panneaux de feutre graphite, d'un revêtement intérieur en CFC et d'un ensemble d'éléments chauffant en graphite. Cette chambre de traitement permet de diminuer les pertes thermiques vers la double paroi. La double paroi refroidie à l'eau assure la tenue au vide et l'étanchéité de la zone de traitement.

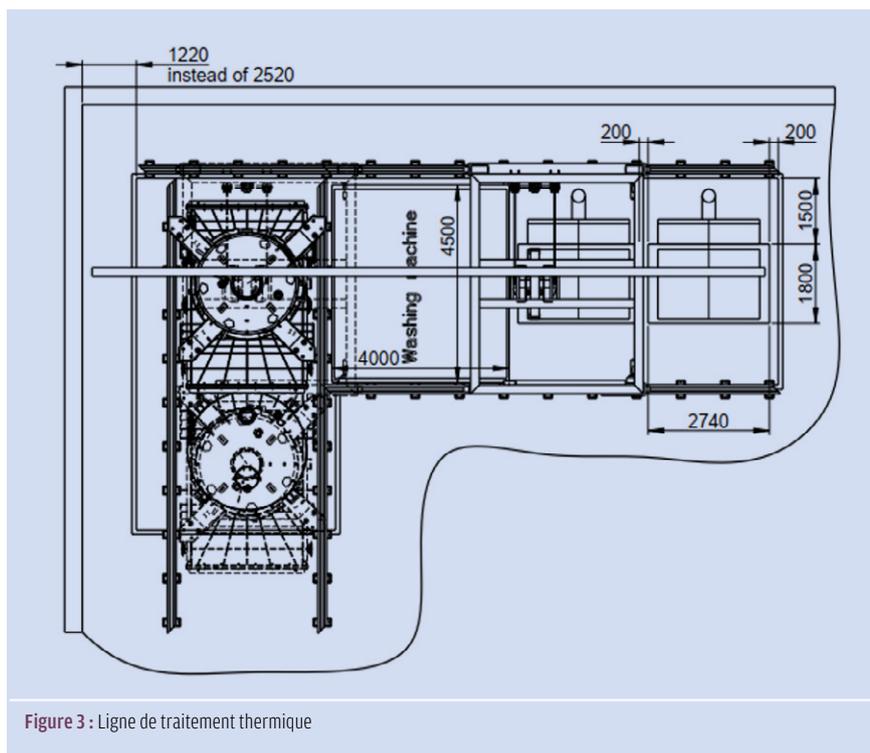


Figure 3 : Ligne de traitement thermique

Des thermocouples suivent la température en différents points de la zone de traitement assurent les fonctions de régulation de température et la sécurité surchauffe de la charge et de l'équipement. Due aux éléments mobiles du four et aux transferts automatiques de la charge entre le four et la chambre de trempe au cours du cycle de traitement, la charge ne peut pas être instrumentée de thermocouples avec liaison filaire. Il existe toutefois des solutions de suivi de température non filaire.

2.3 Chambre de trempe à l'huile

Le four est équipé en standard d'une chambre de trempe huile sous vide avec chauffage d'huile à température régulée jusqu'à 80°C avec brasseurs pour améliorer l'efficacité et l'homogénéité de la trempe. Pour permettre le chargement de la charge dans la chambre de chauffe en production et l'intervention lors les opérations de maintenance, l'huile est transférée automatiquement entre la chambre de trempe et une cuve de stockage étanche. La trempe est réalisée dans l'huile avec pression partielle d'azote au-dessus du

V64THC200	
Caractéristique	Valeur
Volume utile	Ø 1000*2000mm
Charge utile	1200 kg
Température maximum	1250 °C
Homogénéité	+/- 5 °C
Rampe de chauffe en charge maximale	10 °C/min
Vide minimum	10-4 mbar
Taux de fuite	<5 x10 ⁻³ mbar.l/s
Temps de transfert pour la trempe	< 23 s
Volume d'huile de trempe	17 m ³

Tableau 2 : Caractéristiques du four

bain d'huile, en atmosphère protégée. Le temps de transfert de la charge entre la chambre de chauffe et l'immersion complète dans l'huile de trempe est de l'ordre de 20 à 25s.

2.4 Intégration à une ligne de traitement thermique

Il est possible d'intégrer ce four à une ligne de traitement thermique automatisée par sa conception mobile. Cette

Bodycote leader en Traitements Thermiques pour tous les secteurs de l'Industrie

AÉRONAUTIQUE, DÉFENSE ET ÉNERGIE

- aviation commerciale, hélicoptères
- chasseurs militaires
- espace
- pétrole et gaz
- énergies renouvelables
- énergie nucléaire



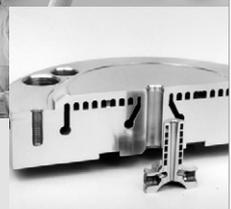
AUTOMOBILE

- autos, motos
- poids lourds
- sports mécaniques



INDUSTRIE GÉNÉRALE

- outillage
- médical, santé et environnement
- agriculture et sylviculture
- agroalimentaire
- construction et génie civil
- exploitation minière
- ferroviaire et marine
- chimie et papier
- électronique et télécommunications
- électricité



Bodycote

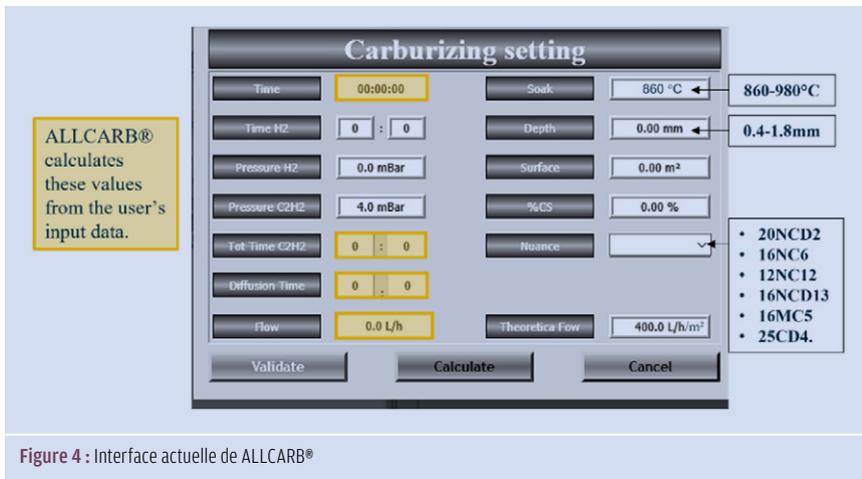


Figure 4 : Interface actuelle de ALLCARB®

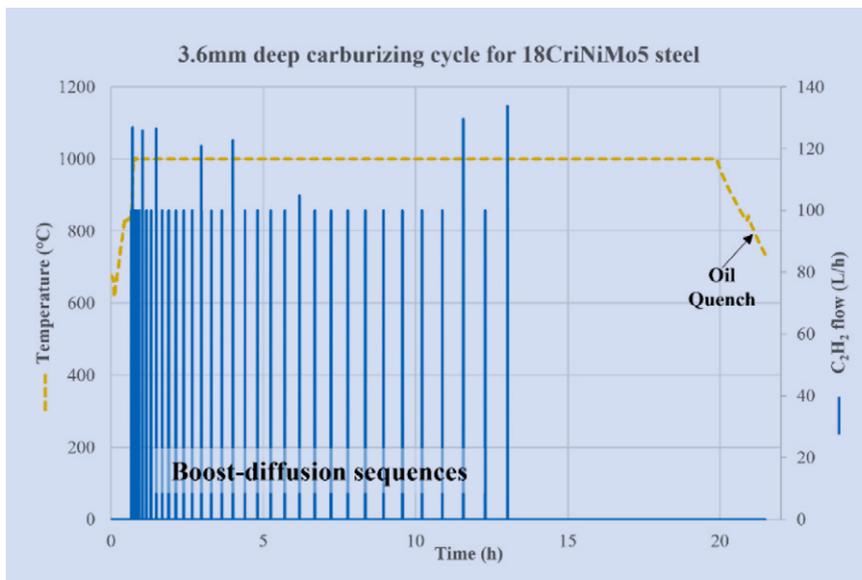


Figure 5 : Cycle de test sur 18CrNiMo5 avec ALLCARB® pour une profondeur de 3,6mm

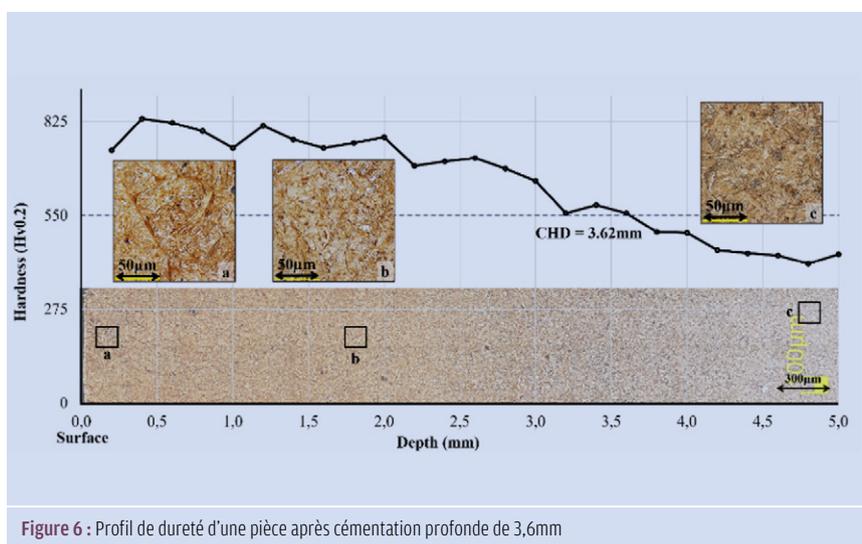


Figure 6 : Profil de dureté d'une pièce après cémentation profonde de 3,6mm

ligne de traitement thermique peut comprendre le nettoyage des pièces, la trempe à l'huile, la trempe au gaz surpressé, avec ou sans cémentation, et des fours de revenu.

(Figure 3 et tableau 2)

3. Matériaux et méthodes

3.2. Cémentation multi-boost ALLCARB®
ALLCARB®, le procédé de cémentation multi-boost à l'acétylène, permet à l'utilisateur de définir automatiquement les paramètres de la recette de cémentation multi-boost. Pour ce faire, l'utilisateur choisit une nuance d'acier dans une liste, une température de cémentation, une profondeur efficace de cémentation, une teneur en carbone de surface souhaitée et la zone de charge à cémenter (figure 4). À partir de ces données d'entrée, ALLCARB® définit le nombre de séquences boost-diffusion et leurs durées respectives. Il est également possible d'injecter de l'H₂ lors de la première séquence de cémentation, que ce soit en mode automatique (ALLCARB®) ou en mode manuel (figure 4).

Afin d'améliorer la flexibilité des paramètres d'entrée fournis par l'utilisateur et de simplifier son utilisation en général, l'assistant ALLCARB® est actuellement en cours de mise à jour. La version actuelle d'ALLCARB® couvre de manière fiable (Fig. 4) :

- o Des températures de cémentation allant de 860 °C à 980 °C ;
- o Des profondeurs de cémentation de 0,4 mm à 1,8 mm ;
- o 6 nuances d'acier de cémentation usuelles (AFNOR) : 20NCD2, 16NC6, 12NC12, 16NCD13, 16MC5 et 25CD4.

Le four est équipé en standard d'une chambre de trempe huile sous vide avec chauffage d'huile à température régulée jusqu'à 80 °C avec brasseurs pour améliorer l'efficacité et l'homogénéité de la trempe.

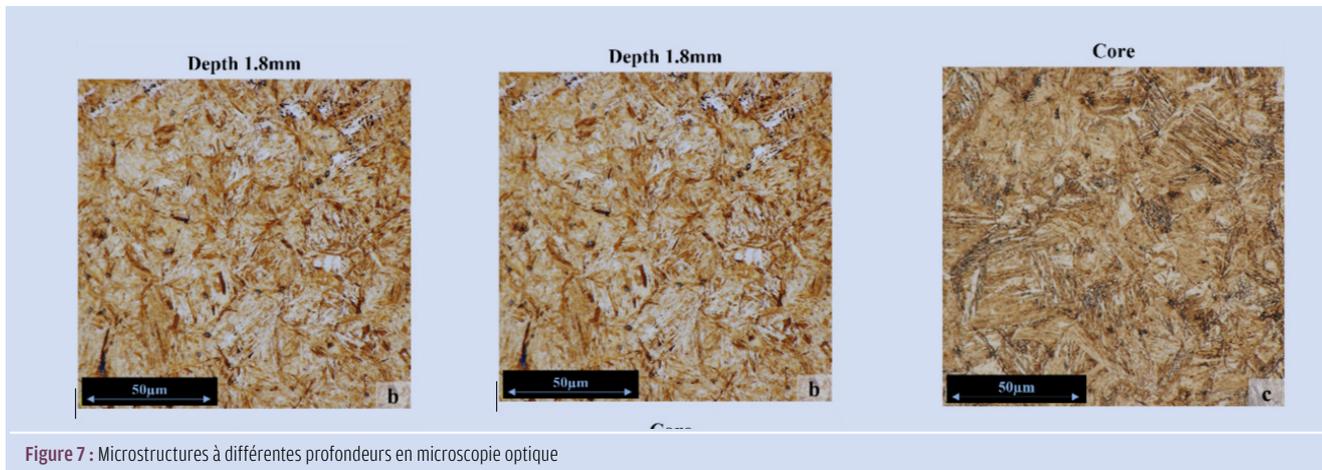


Figure 7 : Microstructures à différentes profondeurs en microscopie optique

2.3. Nuances

Les résultats présentés dans cet article sont centrés sur des échantillons et des pièces fabriqués en une nuance d'acier nouvellement ajoutée à la version améliorée d'ALLCARB® : le 18CrNiMo5. Chaque cycle présenté a été défini avec cette nouvelle version, en utilisant la profondeur

de cémentation et la température de cémentation comme paramètres d'entrée. Le cycle affiché dans la figure 5 a été défini pour une profondeur efficace de cémentation de 3,6 mm et une température de cémentation de 1000 °C.

Remarque : cet article se concentre sur les séquences de cémentation basse pres-

sion. Cependant, ces séquences font partie d'un traitement thermique plus global. Le traitement montré dans la figure 5 inclut des étapes de préchauffage avant d'atteindre la température de cémentation, ainsi qu'un refroidissement naturel et un maintien à la température d'austénitisation avant la trempe à l'huile.

TAV DOUBLE CHAMBRE

FOUR SOUS VIDE DE CÉMENTATION
BASSE PRESSION ET DE TREMPÉ SOUS GAZ

Optimisez vos performances et accélérez votre production

- ✓ Chambre chaude isolée en graphite et chambre froide séparée pour la trempe sous gaz.
- ✓ Cycles plus rapides et plus efficaces.
- ✓ Performances de refroidissement remarquables et répétabilité optimale.
- ✓ Réduction significative de la consommation d'énergie: jusqu'à 40%*
- ✓ Amélioration des propriétés mécaniques des matériaux traités.
- ✓ Distorsions minimisées sur les produits finis.
- ✓ Pas de nettoyage après le traitement.

*Par rapport à un four sous vide à une chambre.



TAV
VACUUM FURNACES

40th
ANNIVERSARY
1984-2024

Nuance	Température	Objectif	Resultat	Durée
18CrNiMo5	1000 °C	3.6 mm	3.62 mm	19 h 06
	930 °C	2.5 mm	2.48 mm	27 h 03
	960 °C		2.55 mm	16 h 53
	980 °C		2.46 mm	12 h 48

Tableau 3 : Données complémentaires sur les temps de cémentation

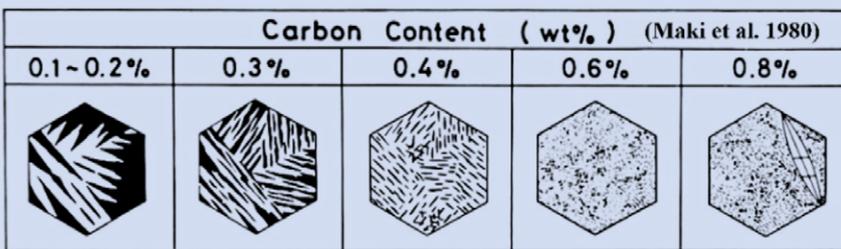


Figure 8 : Représentation schématique des lattes de martensite (blanc) dans les aciers Fe-C avec différents teneurs en carbone^[3]

3. Résultats

3.1. Cémentation profonde

La figure 6 montre un profil de dureté d'une pièce traitée selon le cycle de la figure 5. Le début de la courbe ne révèle aucune baisse importante de dureté due à l'austénite retenue.

La profondeur de cémentation mesurée (à 550HV0.2) est de 3,62 mm, ce qui est proche de la profondeur ciblée de 3,6 mm. Cette profondeur de cémentation se tra-

duit par une dureté superficielle macro de 62,5 HRC avant revenu.

Les versions agrandies des images de microscopie optique a, b et c de la figure 6 sont présentées dans la figure 7. La microstructure est composée de martensite de la surface au cœur, et les images sont en accord avec le profil de dureté. La teneur en carbone diminue avec la profondeur.

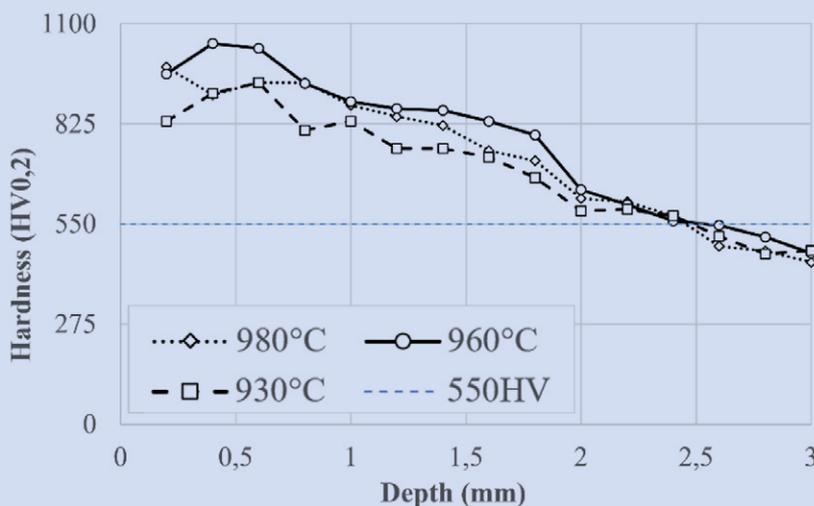


Figure 9 : Profils de dureté de trois pièces cémentées à une profondeur de 2,5 mm à différentes températures



Figure 10 : Microstructure (près de la surface et du cœur) de trois pièces cémentées à une profondeur de 2,5 mm à différentes températures (microscopie optique)

Pour faciliter l'analyse de ces images, la figure 8, issue du travail de Maki et al., représente de manière schématique les lattes de martensite dans un acier Fe-C simple en fonction de sa teneur en carbone^[3].

3.2. Effets de la température de cémentation

Afin de mettre en évidence l'effet de la température de cémentation sur la dureté et la microstructure résultantes, trois traitements sont définis avec la nouvelle version d'ALLCARB®. La profondeur de cémentation visée est de 2,5 mm et trois valeurs de température sont testées (tableau 3). La profondeur de 2,5 mm est choisie pour réduire la durée des tests. En effet, les séquences de cémentation pour atteindre une profondeur de 3,6 mm à 1000 °C ont nécessité plus de 19 heures (figure 5 et tableau 3). Pour une nuance d'acier donnée et une profondeur de cémentation donnée, plus la température de cémentation est basse, plus le temps

de diffusion du carbone est long. En effet, pour une profondeur ciblée de 2,5 mm, la durée de cémentation à 930 °C est plus de deux fois supérieure à celle à 980 °C (tableau 3).

La température de cémentation n'a pas affecté la précision des séquences de cémentation déterminées par ALLCARB®. Pour les 3 températures testées, la profondeur de cémentation obtenue est inférieure de moins de 0,1 mm à la valeur ciblée (tableau 3 et figure 9).

Les profils de dureté sur la figure 9 montrent peu de différences d'une température à l'autre. Aucune tendance claire n'est observée. Étant donné que les valeurs de dureté les plus élevées sont obtenues à 960 °C, la possibilité d'un optimum de température de cémentation doit être étudiée plus en détail. Le profil de dureté après la cémentation à 930 °C est inférieur aux 2 autres profils à chaque point de mesure. Enfin, aucune différence significative n'est

observée pour les microstructures obtenues (figure 10). Elles sont également proches de celle obtenue à 1000 °C pour une profondeur de 3,6 mm (figure 7).

4. Conclusion

Le processus amélioré de cémentation multi-boost à l'acétylène, ALLCARB®, offre la possibilité de définir automatiquement des cycles de cémentation pour des profondeurs élevées et à différentes températures de manière fiable et stable. ■

Références

- ^[1] HERRING, D.H., *Pros and Cons of Atmosphere and Vacuum Carburizing*. Industrial Heating, pp. 45-48.
- ^[2] SUGIYAMA, M., ISHIKAWA, K., *Vacuum carburizing with acetylene*. Advanced materials & processes, 1999, 155(4).
- ^[3] MAKI, T., TSUKAZI, K., TAMURA, I., *The morphology of microstructure composed of lath martensites in steels*. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1980, 20(4), pp. 207-214.

CRONITE
Better by design

Conception et Réalisation de Supports de charge pour tous types de fours de Traitement Thermique en Aciers réfractaires, graphite, CFC ou solutions mixtes

Nouveaux alliages CR pour cémentation basse pression

Nova Loada
Nouveaux paniers modulables pour fours batch

Cronistar
Nouveaux montages pour fours puits

www.cronite-group.com

CRONITE MANCELLE
Route du Lude - CS 20075 - 72233 Arnage Cedex - France
Tel +33 (0)2 43 47 58 58 - Fax +33 (0)2 43 21 24 63
christophe.pascal@cronite-group.com

Rodolphe.design.com