HAL open science

Les Carbures cémentés WC-Co

Emmanuel Pauty

To cite this version:

Emmanuel Pauty. Les Carbures cémentés WC-Co. Mottin, Stéphane and Lelièvre, Gérard. Matériaux et joints d'étanchéité pour les hautes pressions, 18, MRCT-CNRS, pp.91-103, 2011, Intégrations des savoirs et des savoir-faire, 978-2-918701-04-0. 10.5281/zenodo.400485 . hal-01472120

HAL Id: hal-01472120

https://hal.science/hal-01472120

Submitted on 30 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Cliquer sur les N° dsommaire pour parcourir plus vite ce document.

Les carbures cémentés WC-Co **91**

1 – Les procédés de fabrication 91

1 – 1. Séchage-granulation *92*

1 – 2. La mise en forme : compression et usinage à crû *92*

1 – 3. Frittage *93*

1 – 4. La qualité métallurgique *94*

1 – 5. Les finitions *95*

2 – Les propriétés des carbures cémentés 96

2 – 1. Module d'Young et coefficient de Poisson *96*

2 – 2. Dureté et ténacité *96*

2 – 3. Résistance mécanique en flexion et en compression *97*

2 – 4. Tenue en fatigue *99*

2 – 5. Propriétés thermiques *100*

2 – 6. Tenue à la corrosion et à l'oxydation *101*

3 – Conclusions 102

4 – Bibliographie 103

« Intégrations des savoirs et savoir-faire » (*S. Mottin*) // sous licence CC-BY-NC-ND

Liens : https://doi.org/10.5281/zenodo.400485
http://www.sudoc.fr/155436619
https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01472120
https://hal.archives-ouvertes.fr/INTEGRATIONS/page/materiaux-et-joints-etancheite-pour-les-hautes-pressions
https://zenodo.org/communities/integrations

Référence au format BibTeX :

@inbook{8materiaux18_2011,
location = {Meudon},
edition = {[3e éd.]},
title = {Les Carbures cémentés WC-Co},
isbn = {978-2-918701-04-0},
url = {http://www.sudoc.fr/155436619},
series = {Intégrations [des savoirs et des savoir-faire]},
abstract = {Préface / Dominique Leguillon P. 17. Introduction générale / Patrick Boissinot, Patrick Langlois, Agílio A.H. Pádua P. 21. Introduction au dimensionnement / Agílio A.H. Pádua 1 — Définition du problème 2 — Dimensionnement 3 — Obturateurs 4 — Conclusion P. 31. Frettage et autofrettage / Patrick Langlois 1 — Considérations préliminaires au frettage 2 — Frettage d'une enceinte bibloc 3 — Frettage d'une enceinte multibloc 4 — Formulation de l'autofrettage 5 — Modes de réalisation de l'autofrettage 6 — Conclusion P. 55. Méthodes d'éléments finis en calcul de structures élastiques / Joël Frelat 1 — Introduction 2 — Rappel de la formule théorique 3 — Formulation variationnelle 4 — Formulation numérique 5 — Etapes d'une mise en œuvre pratique 6 — Conclusion – Extension aux problèmes non linéaires P. 65. Les matériaux sidérurgiques et les hautes pressions / Jean-Paul Dichtel 1 — Caractérisation mécanique des aciers 2 — Métallurgie des aciers et superalliages 3 — Commentaires : la Directive Européenne Appareils à Pression P. 77. Les métaux non ferreux – Alliage cuivre-béryllium et titane / Jean-Pierre Petitet 1 — Introduction 2 — Le cuivre-béryllium 3 — Le titane P. 85. Les Carbures cémentés {WC}-Co / Emmanuel Pauty 1 — Les procédés de fabrication 2 — Les propriétés des carbures cémentés 3 — Conclusions P. 99. Choix et usinage des carbures de tungstène / Jacques Calzas 1 — Choix des carbures de tungstène 2 — Usinage du carbure de tungstène P. 111. Céramiques et matériaux pour l'optique / Jean-Claude Chervin 1 — Céramiques 2 — Matériaux pour l'optique P. 141. Types de joints et de montage / Roger Argoud et Jacques Roux 1 — Introduction 2 — Généralités 3 — Joints à basse pression 4 — Joints cône sur cône 5 — Joints Bridgman Champignon 6 — Joints annulaires auto-serrés 7 — Joints coniques d'Amagat 8 — Autres joints 9 — Conclusion P. 161. Joints hautes pressions pour la compression de gros volumes solides / Sylvie Le Floch 1 — Joints solides utilisés dans les différents types d'enceintes hautes pressions 2 — Matières premières des joints 3 — Assemblages {HP}-{HT} P. 173. Le matériel standard / Jean-Pierre Petitet 1 — Tubes, conduites et raccords 2 — Les vannes 3 — Quelques types d'enceintes commercialisées 4 — Les générateurs de pression 5 — Le matériel moins standard P. 187. Assemblages haute pression / Gérard Hamel 1 — Montage des raccords de pressions 2 — Montage de quelques passages électriques 3 — Les passages de thermocouple 4 — Les passages optiques, montage des fenêtres 5 — Montage des joints et des obturateurs sur une cellule haute pression P. 197. Usinage / Jean-Pierre Michel 1 — Introduction 2 — Les joints de faible épaisseur 3 — Les bagues anti-extrusion à 45° 4 — Les joints à 45° 5 — Les joints « double Bridgman » 6 — Les joints plats en élastomères 7 — Les joints en indium (étanchéité en hélium et azote liquide 8 — Joints métal-métal type Lens ring 9 — Les passages du courant 10 — Usinage de matériaux exotiques P. 211. Les règles de sécurité / Patrick Boissinot 1 — Dangers présentés par les appareils à pression 2 — Appareils à pression rencontrés dans les laboratoires et facteurs de risques 3 — Principes généraux de prévention et réglementation 4 — Moyens de protection 5 — Conclusion},
pages = {81--95},
number = {18},
booktitle = {Matériaux et joints d'étanchéité pour les hautes pressions},
publisher = {{MRCT}-{CNRS}},
author = {Pauty, Emmanuel},
bookauthor = {Boissinot, Patrick and Langlois, Patrick and Pádua, Agílio},
editor = {Mottin, Stéphane and Lelièvre, Gérard},
editorb = {Mottin, Stéphane},
editorbtype = {redactor},
date = {2011},
langid = {french},
keywords = {Hautes pressions -- Matériaux, Joints d'étanchéité, Matériaux -- Effets des hautes pressions} , doi = {10.5281/zenodo.400485},
}

Les carbures cémentés WC-Co

Emmanuel Pauty

Sandvik Hard Materials
54 avenue Rhin et Danube, BP65
38041 Grenoble Cedex 9

Les carbures cémentés WC-Co sont des composites céramique - métal, dont la phase dure est le carbure de tungstène et la phase liante le cobalt. Ces matériaux ont des propriétés mécaniques remarquables, qui leur permettent d'allier résistance à l'usure et résistance en compression, à une excellente tenue au choc tant mécanique que thermique [1]. Cet article présente les procédés de fabrication des carbures et leurs propriétés.

1 – Les procédés de fabrication

Les procédés de fabrication des carbures cémentés sont illustrés dans la Figure 1.

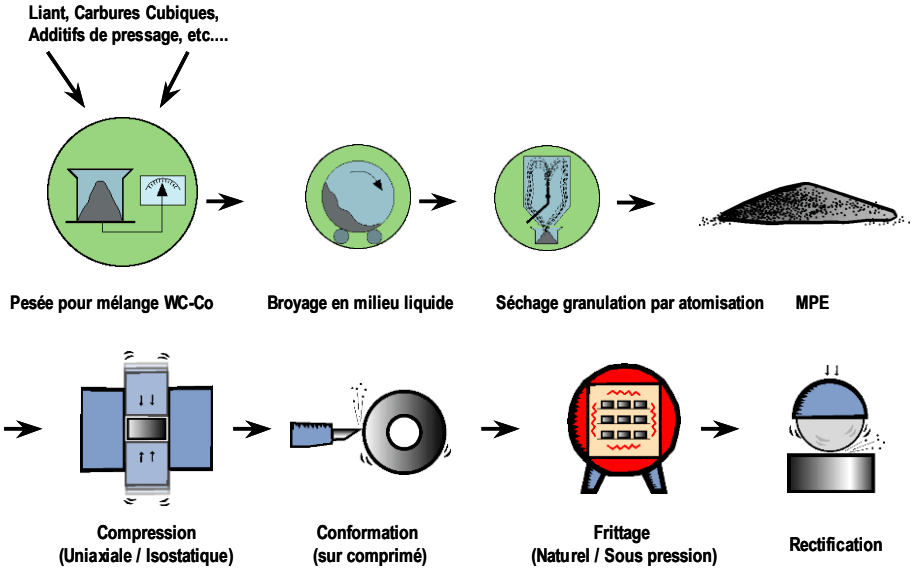

Figure 1 – Les procédés de fabrication des carbures cémentés Broyage

Les poudres de cobalt et de carbure de tungstène sont mélangées par broyage en milieu liquide. L'objectif de ce broyage n'est pas de diminuer la taille des grains, mais de casser les

agglomérats et d'obtenir un mélange parfaitement homogène. On utilise des agents broyants en carbure cémenté afin d'éviter toute pollution.
Un liant organique soluble dans le liquide est ajouté dès l'étape du broyage afin de garantir sa parfaite répartition. Le rôle de ce liant organique est :

- de permettre une étape ultérieure de granulation
- de protéger les poudres de l'oxydation
- de donner une tenue à crû satisfaisante aux comprimés afin de permettre leur usinage.

1 – 1. Séchage-granulation

A l'issue du broyage, le liquide chargé des particules de cobalt et de carbure de tungstène, et dans lequel est dissous ce liant organique, subit une opération de séchage-granulation. Le liquide est pulvérisé en fines gouttelettes dans une chambre de séchage où circule de l'azote chaud. Les gouttelettes sont séchées, et on récupère des granulés de diamètre variant de 40 à 200 µm, dans lesquels les poudres WC et Co sont intimement liées par le liant organique.
La poudre ainsi granulée est appelée « mélange prêt à l'emploi» (MPE). Les MPE ne sont plus pulvérulents et ceci présente plusieurs avantages :

- ils peuvent être manipulés sans risque par les opérateurs
- la forme sphérique des granulés confère au mélange une bonne coulabilité d'où des remplissages rapides et homogènes.

La densité apparente des mélanges granulés varie de 2,8 à 3,5 g/cm^3.

1 – 2. La mise en forme : compression et usinage à crû

Le procédé de mise en forme le plus utilisé est la compression uniaxiale en matrice fermée. Cette opération est réalisée sur des presses hydrauliques, mécaniques ou rotatives.

Les presses hydrauliques ont en règle générale des capacités plus importantes (supérieures à 50 tonnes) que les presses mécaniques, mais ont l'inconvénient d'être plus lentes. Les presses rotatives comportent 10 à 30 jeux d'outillages identiques et tournent à la vitesse de 15 à 50 tours par minute, ce qui leur donne une très grande productivité, mais des coûts d'outillage également très importants.

Les domaines d'utilisation de ces différentes presses sont donc clairement délimités :

- les presses hydrauliques sont réservées aux pièces présentant une surface comprimée étendue, avec une hauteur réduite comparée à leur surface. Les séries sont en général de taille limitée.
- les presses mécaniques sont les plus utilisées, car elles permettent la compression de pièces de petite ou de moyenne taille. La cadence de frappe varie de 10 à 20 coups par minute, ce qui autorise déjà la réalisation de grandes séries.
- les presses rotatives sont réservées aux très grandes séries et souvent pour des pièces plutôt petites. En effet les coûts importants d'outillage ne peuvent être amortis que sur un très grand nombre de pièces.

La compression en matrice fermée permet un très bon contrôle des dimensions du comprimé: les cotes sont données par la géométrie de la matrice et par la hauteur comprimée. Par contre, il y a pendant l'opération de compression des frottements poudre/matrice, qui

génèrent un gradient de densité sur le comprimé. Ces variations de densité donneront des variations dimensionnelles après frittage, et les pièces devront être reprises en rectification si les déformations sont inacceptables pour l'application envisagée. Pour pallier cet inconvénient, on utilise également souvent la compression isostatique à froid en particulier dans le cas de pièces très volumineuses, pour lesquelles ces variations dimensionnelles deviennent trop importantes.

Lors de la compression isostatique, la poudre est introduite dans une chaussette de polyuréthane ou de latex. Après avoir fait un vide étanche, la chaussette est placée dans une enceinte remplie d'eau, où l'on augmente la pression jusqu'à un niveau de compression compris entre 150 et 200 MPa (1500 à 2000 bar). Ce mode de mise en forme se caractérise par des gradients de densité réduits, mais la géométrie du comprimé n'est pas parfaitement maîtrisée. Aussi il est nécessaire d'usiner le crû avant frittage pour obtenir une parfaite maîtrise des cotes frittées.

L'opération de compression se fait par réarrangement des grains les uns par rapport aux autres [2]. La densité des comprimés correspond à environ 52 à 55 % de la densité frittée, soit 7,5 à 8,5 g/cm^3.

1 – 3. Frittage

Le déliantage. Il se réalise entre 100 et 450°C sous une atmosphère d'azote ou d'hydrogène selon le liant organique à éliminer. Pendant cette montée en température, le liant se décompose en sous-produits gazeux, qui sont éliminés par la circulation des gaz.

La montée en température. En fin de déliantage, on réalise un vide primaire, puis on monte en température jusqu'à l'apparition de la phase liquide. Les oxydes de cobalt et de tungstène répartis à l'état de traces sont alors réduits en consommant une partie du carbone libre disponible. Pendant la montée, le carbure de tungstène se dissout dans le cobalt jusqu'à atteindre la solubilité maximale de 16 masse % à 1275°C [2]. A l'apparition de la phase liquide, plus de 80 % du retrait s'est réalisé en phase solide. Un squelette de WC a été formé essentiellement par réarrangement des grains de WC. On note déjà un facettage des grains de WC [2].

L'apparition de la phase liquide. La fusion de la solution solide Co-WC se produit entre 1275 et 1340 °C, température à laquelle le cobalt est complètement fondu [3]. On fait alors un palier en température afin de s'assurer que toutes les pièces du four passent en phase liquide en même temps, avant de poursuivre la montée. On casse également le vide avec de l'argon, afin de limiter la cinétique de vaporisation du cobalt. Les mécanismes débutés en phase solide tels que le réarrangement et la dissolution/précipitation du WC s'accélèrent.

Le palier de frittage. La température de frittage dépend de la composition de la nuance (taille des grains de WC, teneur en cobalt). Elle varie entre 1350 et 1500°C. Après quelques minutes, le carbure est complètement densifié. Seuls quelques pores isolés restent stables. La taille des pores stables dépend de la composition de la nuance [4]. En fin de frittage, les grains de WC ont grossi (mûrissement d'Ostwald) et sont facettés. En plus du mûrissement d'Ostwald, il existe une croissance dite anormale des grains de WC : les plus petits grains se dissolvent dans la matrice et le WC dissous reprécipite de façon préférentielle sur les grains les plus gros et leur croissance est alors catastrophique [5]. Afin de maîtriser la qualité des frittés, on ajoute d'autres carbures métalliques, qui inhibent ou ralentissent ces phénomènes.

Le frittage sinterhip. Lorsque le four le permet, on augmente la pression d'argon dans le four jusqu'à 60 à 100 bar. Cette pression supplémentaire permet de réduire les derniers pores stables.

« Intégrations des savoirs et savoir-faire » (*S. Mottin*) // sous licence CC-BY-NC-ND

Le refroidissement. Il se fait lentement sous argon, jusqu'à température ambiante. Il s'est alors écoulé entre 15 et 48 heures pour un cycle industriel.

Pendant l'opération de frittage, se produit un retrait linéaire de 18 à 20%. Les pièces obtenues sont complètement denses, la porosité résiduelle ne dépassant pas 0,02 vol. % dans la très grande majorité des cas.

1 – 4. La qualité métallurgique

La masse volumique. La détermination de la densité reste la première opération de contrôle. Elle est faite en suivant la norme ISO 3369 par double pesée dans l'air et dans l'eau. Le but de ce contrôle n'est pas de vérifier l'absence de porosité, mais de constater que l'on a la bonne teneur en cobalt. En effet, la différence de densité entre le cobalt (8,9) et le carbure de tungstène (15,67) permet de détecter immédiatement une erreur de nuance.

La teneur en carbone et l'aimantation à saturation. Les deux phases WC-Co coexistent seules dans une fenêtre déterminée de carbone (Figure2), dont la largeur est fonction de la teneur en cobalt [6].

Si la teneur en carbone excède la limite supérieure de cette fenêtre, il y a alors présence de carbone libre. Par contre, si la teneur en cobalt est inférieure à la limite basse, il y a formation du composé Co_3W_3C, appelé phase η. Cette dernière phase est très fragilisante. D'une façon générale, et sauf volonté délibérée, la présence de carbone libre et de phase η sont à proscrire.

La mesure de l'aimantation à saturation permet d'estimer très rapidement une faible teneur en carbone : 1% massique de cobalt pur génère une aimantation à saturation de $2{,}015.10^{-6}$ $T.m^3.kg^{-1}$.

Mais lorsque la teneur en carbone est insuffisante, le tungstène en excès forme une solution solide avec le cobalt, ce qui diminue cette aimantation.

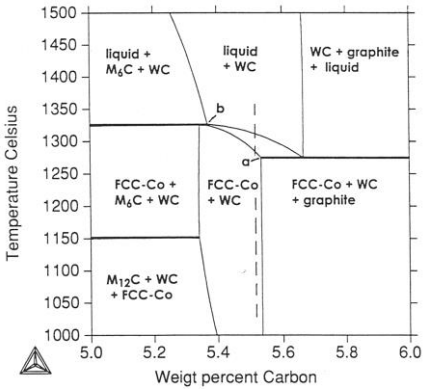

Figure 2 – Coupe du diagramme ternaire W-C-Co pour un rapport W/C constant d'après [6].

Cette mesure est très rapide et souvent utilisée en contrôle de production. Elle est définie par la norme NF A 95-432.

La porosité. La cotation de la porosité est normalisée (ISO 4505). L'absence de porosité est contrôlée en microscopie optique sur un poli miroir. Les métallographes effectuant ce contrôle sont spécialement formés : l'observation se fait à un grandissement de 100 et on doit observer 1 cm^2 d'échantillon, ce qui nécessite des yeux expérimentés. La cotation se fait par comparaison avec des planches de référence données par la norme. On distingue trois types

de porosité appelée A, B et C. Les pores A ont une taille inférieure à 10 µm, les pores B une taille de 10 à 25 µm. La porosité C correspond en fait à du carbone libre : en effet le carbone libre ressemble au grandissement de 100 à des nuages de petits pores, qui sont aisément reconnaissables. La quantité de pores est cotée par 2 chiffres, qui correspondent à une fraction volumique de pores : 00 (pas de porosité), 02 (0,02 vol. %), 04 (0,06 vol. %), 06 (0,2 vol. %) ou 08 (0,6 vol. %). Par exemple, une cotation A02 B00 C00, signifie qu'on a observé 0,02 % volumique de pores de taille inférieure à 10 µm, et qu'il n'y avait pas de pores B, ni de carbone libre. Les pores de taille supérieure à 25 µm, sont rangés par classes (25-75 µm, 75-125 µm, > 125 µm) et sont comptés en nombre de pores par cm^2.

La dureté et le champ coercitif. La dureté est déterminée en suivant les normes ISO 3878 pour la dureté Vickers et ISO 3738 pour la dureté Rockwell A. La dureté Rockwell A n'est pratiquement utilisée qu'en Amérique du Nord. Dans les deux cas, il est nécessaire de faire des échanges d'échantillons de référence, si l'on souhaite comparer avec précision des essais réalisés sur des duromètres différents. La dureté est tout naturellement fonction de la teneur en cobalt et de la taille des grains (Figure 3). On a vu que la taille des grains évolue pendant le broyage et aussi lors du frittage. La maîtrise de la dureté constitue le savoir-faire de base de tout carburier.

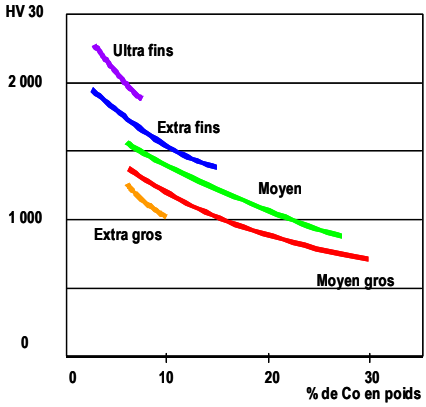

Figure 3 – Evolution de la dureté en fonction de la composition.

Une méthode de contrôle fréquemment utilisée est la mesure du champ coercitif de l'échantillon. Le carbure de tungstène est paramagnétique, tandis que la phase cobalt est ferromagnétique. La taille des grains de cobalt est conditionnée par la taille des grains de WC, et plus les grains sont petits, plus le champ coercitif augmente : la séparation des domaines magnétiques devient de plus en plus fine, et l'annulation de l'aimantation résiduelle devient plus difficile.

Cette image de la taille des grains est toutefois fortement influencée par la teneur en cobalt et aussi par la teneur en carbone, et cette méthode normalisée (ISO 3326) n'est utilisée qu'en contrôle de production.

1 – 5. Les finitions

Il n'y a guère que deux façons d'usiner les carbures cémentés : la rectification à la meule diamant et l'électro-érosion.

Il faut noter que cette dernière méthode d'usinage permet d'élaborer des formes complexes, que l'on ne peut pas toujours obtenir dès la compression. Toutefois lorsqu'elle est faite sans précaution, elle génère en surface une zone fondue importante, des zones corrodées et des micro-fissurations. La zone perturbée peut atteindre plusieurs dizaines de microns et est très dangereuse pour la tenue mécanique de la pièce. Au contraire, l'utilisation des dernières techniques disponibles permet de limiter la zone perturbée à quelques microns. Dans tous les cas, il est nécessaire d'effectuer une rectification des surfaces électro-érodées pour garantir la tenue mécanique des pièces.

La rectification des carbures permet naturellement l'obtention de cotes très précises, ainsi que des états de surface d'excellente qualité. C'est toutefois une opération coûteuse, ce qui explique l'importance d'être au plus près des cotes finies après frittage.

2 – Les propriétés des carbures cémentés

2 – 1. Module d'Young et coefficient de Poisson

Le module d'Young du carbure de tungstène est le plus élevé après celui du diamant avec 720 GPa. Mélangé au cobalt de module d'Young 290 GPa, on obtient des carbures cémentés très rigides dont les modules d'Young varient de 450 à 700 GPa (Figure 4).

Le coefficient de Poisson varie peu, entre 0,22 et 0,24.

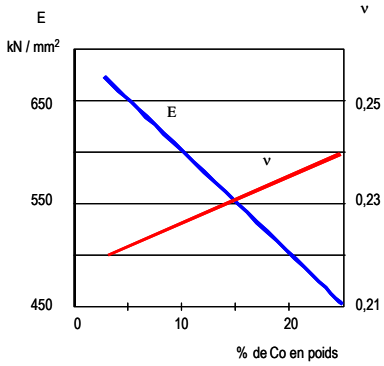

Figure 4 – Evolution du module d'Young et du coefficient de Poisson en fonction de la composition.

2 – 2. Dureté et ténacité

La dureté est fonction de la taille des grains et de la teneur en cobalt. La possibilité de faire varier ces deux paramètres sur des plages importantes (de 0,2 à 20 µm pour la taille des grains et de presque 0 à 25 % pour la teneur en cobalt) permet d'obtenir des duretés variant de 800 à plus de 2000 HV_{50}. Plus les grains sont fins et moins il y a de cobalt, plus le carbure cémenté est dur. A chaud, la dureté évolue peu jusqu'à 100 °C, puis diminue rapidement pour atteindre la moitié de la dureté à température ambiante vers 600 °C. Ce sont des considérations importantes pour le choix de carbures devant fonctionner sous très forte contrainte et à haute température.

« Intégrations des savoirs et savoir-faire » (*S. Mottin*) // sous licence CC-BY-NC-ND

La ténacité est estimée d'après la méthode de Palmqvist à partir des longueurs des fissures formées dans les angles d'une indentation de dureté Vickers [7,8]. La ténacité varie de 5 à 25 MPa.m$^{1/2}$ et peut donc atteindre des valeurs tout à fait comparables à celles des aciers rapides (Figure 5). La ténacité varie en sens inverse de la dureté.

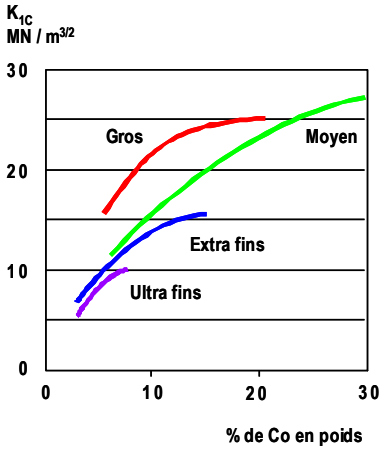

Figure 5 – Evolution de la ténacité en fonction de la composition.

2 – 3. Résistance mécanique en flexion et en compression

La caractérisation des carbures cémentés en flexion et en compression est normalisée par les normes respectives ISO 3327 et ISO 4506. Toutefois ces normes préconisent de retenir comme valeur de référence la moyenne arithmétique d'au moins 5 essais. Si cette moyenne permet de comparer les nuances entre elles, elle n'autorise pas, par exemple, l'élaboration d'un dimensionnement.

Ainsi la résistance en flexion est optimale entre 15 et 20 % de cobalt. En effet, au delà de 10 %, la plupart des grains de WC ne se touchent plus et la souplesse donnée par le cobalt joue alors à plein. Au-delà de 20 %, la distance entre grains de WC s'accroît et leur efficacité en tant que renfort du cobalt diminue. Plus les grains sont fins, et plus la résistance en flexion est élevée (Figure 6).

« Intégrations des savoirs et savoir-faire » (*S. Mottin*) // sous licence CC-BY-NC-ND

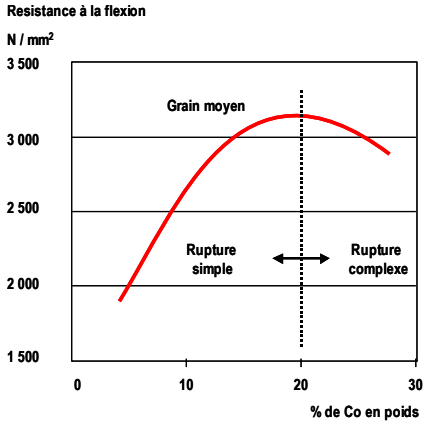

Figure 6 – Evolution de la résistance en flexion en fonction de la composition.

En compression, les valeurs maximales sont obtenues également pour des grains fins, mais pour les faibles teneurs en cobalt (Figure 7).

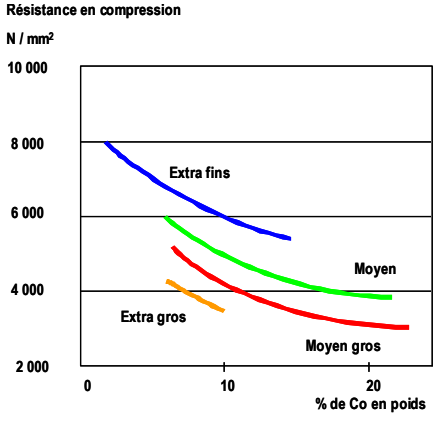

Figure 7 – Evolution de la résistance en compression en fonction de la composition.

En effet, en diminuant la teneur en cobalt, on augmente le nombre de contacts entre grains de WC, ce qui est tout à fait favorable dans le cas d'une compression. En deçà de 3 %, la phase cobalt ne percole plus, et les améliorations doivent être faibles.

Si on cherche à comprendre un peu mieux les phénomènes de rupture dans les carbures cémentés, il faut aborder les notions de défaut critique et de statistique de Weibull.

Roebuck [9] explique qu'il existe une taille de défaut critique au-delà de laquelle la résistance mécanique des carbures cémentés diminue (Figure 8).

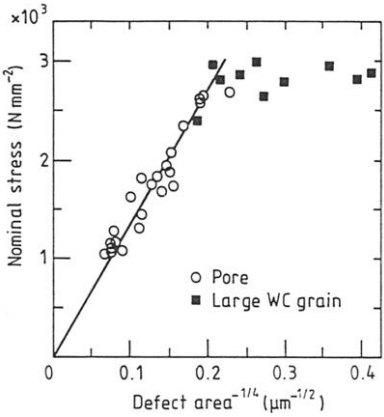

Figure 8 – Relation entre résistance mécanique et taille de défaut d'après [9].

La taille de défaut critique est directement fonction de la composition du carbure (taille du WC et teneur en cobalt). Roebuck propose comme ordre de grandeur de taille critique environ 15 à 20 fois la taille du WC pour 6 % de cobalt, c'est-à-dire que pour une taille observée de 1 µm, les défauts de taille supérieure à 15-20 µm diminueront la résistance mécanique du carbure.

Lorsqu'on sollicite fortement un volume de matière, sa résistance mécanique est alors liée à la probabilité de trouver un défaut supérieur à la taille critique dans le volume donné. Cette probabilité peut être étudiée à l'aide d'une statistique de Weibull, qui permet d'associer une probabilité de rupture à un chargement donné [10].

On comprend alors, que si les nuances à grains très fins ont des propriétés mécaniques moyennes supérieures aux autres nuances, elles présentent plus de dispersion en terme de performance, c'est-à-dire qu'il est plus facile de trouver un défaut critique dans une nuance à grains fins que dans les autres. Aussi pour améliorer les performances des grains les plus fins, tant en moyenne qu'en dispersion, il est nécessaire d'effectuer des frittages sinterhip sur ces nuances. On touche ici au problème limitant de l'utilisation des carbures de tungstène pour les très hautes pressions en grand volume.

On notera aussi que les défauts peuvent être volumiques, mais aussi surfaciques, la résistance mécanique dépend donc aussi de l'état de surface [11] et les zones les plus sollicitées doivent être réalisées avec soin.

2 – 4. Tenue en fatigue

Les études sur la fatigue sont peu nombreuses, alors que les configurations possibles sont très variées. Sandvik indique que la tenue en fatigue pour 2 millions de cycles représente 65 à 85 % de la résistance statique pour un chargement alternatif en compression à 250 MPa (Figure 9).

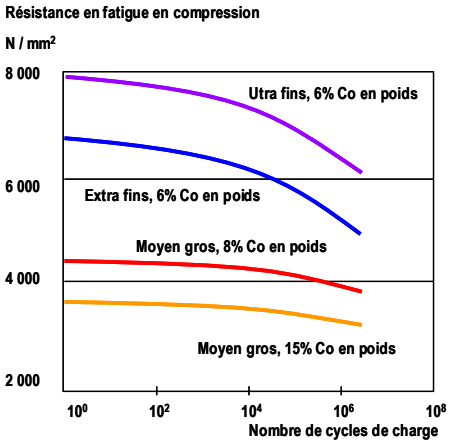

Figure 9 – Tenue en fatigue en compression pour 2 millions de cycles pour quelques nuances.

Contrairement aux métaux, il n'existe pas de limite d'endurance pour les carbures, c'est-à-dire que même une sollicitation faible, si elle est répétée fréquemment, affectera la tenue mécanique d'un carbure cémenté [12]. L'endommagement commence en général dans la phase liante, tandis que la phase WC n'est pas affectée [13]. C'est pourquoi il apparaît nécessaire de chercher à diminuer la taille des grains afin de limiter la concentration en cobalt dans le cas recherché d'une utilisation des carbures sous très haute pression.

2 – 5. Propriétés thermiques

Le coefficient de dilatation linéique des carbures cémentés est environ la moitié de celui des aciers, ce qui doit être pris en compte lors de la conception d'assemblage carbure/acier. Le coefficient de dilatation augmente avec la teneur en cobalt (Figure 10**).**

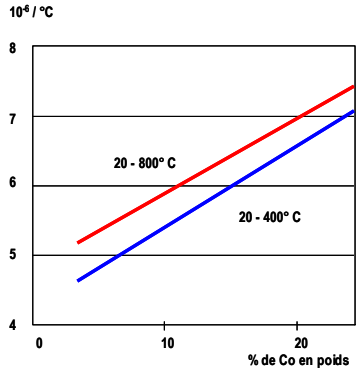

Figure 10 – Evolution du coefficient de dilatation thermique linéique en fonction de la teneur en cobalt.

La conductivité thermique est fonction de la composition du carbure cémenté [14, 15]. Ainsi les carbures cémentés à gros grains et à faible teneur en cobalt sont les plus conducteurs avec 140 $Wm^{-1}K^{-1}$ à température ambiante (Figure 11).

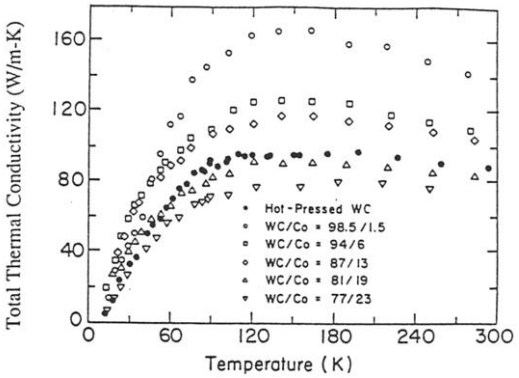

Figure 11 – Conductivité thermique pour quelques nuances d'après [14].

2 – 6. Tenue à la corrosion et à l'oxydation

Les carbures cémentés WC-Co se corrodent rapidement par effet pile pour les pH inférieurs à 11. La corrosion dissout localement le cobalt, et il ne reste plus qu'un squelette très friable de WC [16]. Pour obtenir des tenues satisfaisantes à la corrosion, il est nécessaire de substituer au cobalt, un liant nickel, dans lequel on ajoute les éléments apportant habituellement une amélioration tels que le chrome et le molybdène [17]. Chaque cas est particulier, et il est nécessaire en général de réaliser des essais. Les liants développés par Sandvik permettent de tenir des pH inférieurs à 1 avec la plupart des acides.

Pour ce qui est de l'oxydation, c'est le WC qui constitue le point faible. Les cinétiques d'oxydation des carbures restent limitées en-dessous de 500 °C (Figure 12), et deviennent importantes au-delà de 700 °C [17]. Lorsque l'on souhaite travailler à haute température et en atmosphère oxydante, on se tourne en général vers des cermets renforcés par des carbonitrures de titane qui permettent alors d'apporter satisfaction.

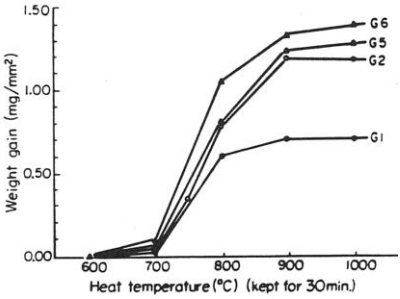

Figure 12 – Cinétique d'oxydation pour quelques nuances d'après [17].

Tableau 1 – Sélection de quelques carbures propres à l'utilisation sous très haute pression

Nuance	WC (poids %)	Co (poids %)	Autres (poids%)	Finesse des grains WC
3UF	96.4	3.0	0.6	Ultrafine
6UF	93.1	6.0	0.9	Ultrafine
8UF	91.0	8.0	1.0	Ultrafine
H3F	97.0	3.0		Extrafine
H3M	96.5	3.5		Fine

Nuance	Masse volumique (g/cm^3)	Conductivité thermique (W / mK)	Résistivité électrique ($\mu\Omega cm$)	Coefficient de Dilatation (10^{-6} / °C) (20-800°C)
3UF	15.5	90	20	5.2
6UF	14.75	85	20	5.5
8UF	14.5	85	19	5.8
H3F	15.3	95	20	5.0
H3M	15.20	100	20	5.0

Nuance	Dureté (HV_{30}) à 20°C	Contrainte à la rupture (N / mm^2)	Ténacité ($MN / m^{3/2}$)	Résistance à la compression (N / mm^2)
3UF	>2250	2100	5	11500
6UF	2050	2400	8	9000
8UF	1900	2600	10	7700
H3F	1925	2200	7	7800
H3M	1750	1700	9	6900

Nuance	Module d'Young (KN / mm^2)	Coefficient de Poisson
3UF	670	0.22
6UF	630	0.22
8UF	600	0.22
H3F	670	0.21
H3M	670	0.22

3 – Conclusions

Au travers de cette rapide présentation, on a vu que les carbures cémentés présentent des propriétés tout à fait nécessaires dans bon nombre d'applications, où des propriétés mécaniques élevées sont demandées. Il apparaît que, pour les applications à la haute pression il est préférable de diminuer, voire supprimer, l'ajout de liant et favoriser au maximum la finesse des grains.

(Il existe sur le marché des nuances de carbures sans liant, fournies à la demande).

C'est par une meilleure connaissance des propriétés que l'on peut concevoir et mettre en oeuvre les carbures cémentés en respectant les objectifs de performance, mais aussi par une meilleure connaissance des procédés de fabrication que l'on peut maîtriser les coûts de

production : en effet c'est en « pensant carbures cémentés » dès la conception que l'on satisfait à la fois les critères techniques et économiques.

Pour ce qui est des caractérisations, il reste encore à accumuler beaucoup d'expérience pour permettre de concevoir des applications de plus en plus pointues, en particulier dans le domaine des hautes pressions.

4 – Bibliographie

[1] H.Pastor,«Fabrication et propriétés d'utilisation des cermets carbure de tungstène-cobalt -prospective dans le domaine de la coupe», *Matériaux et Techniques*, pp 433-450, Décembre 1984.

[2] S.Roure, « Densification des mélanges de poudres WC-Co : de la compression au frittage », *Thèse de Doctorat, INPG Grenoble, Décembre 1996.*

[3] C.H.Allibert, *Contract report*, 1997.

[4] A.F. Lisovski, *Métall. and Mater. Trans.*, 25A (1993), pp. 733.

[5] Y.J. Park et al., « Abnormal grain growth in a liquid matrix », *Proc.of the 2nd Pacific Rim Inter. Conf. on Adv. Mater. and Processing, Ed. K.S. Shin, The Korean Institute of Metals and Mater.*, 1995, pp. 407-412.

[6] B. Uhrenius, « Phase Equilibria and the Sintering of Cemented Carbides », *Proc. Of the Powder Metallurgy World Congress* – Paris 6-9 June 1994, Vol2, pp. 1443-1450. http://dx.doi.org/10.1016/0026-0657(95)91818-3

[7] R. Spiegler et al., « Fracture toughness evaluation of WC-Co alloys by indentation testing »,*J. Hard Mater.*, vol.1 (3), 1990, pp.147-158.

[8] C.B. Ponton et al., « Dependence of the Vickers indentation fracture toughness on the surface crack length », *Br. Ceram. Trans. J.*, Vol. 88, 1989, pp. 89-90.

[9] B. Roebuck, « A model for the limiting strength of hardmetals », *J. Hard Mater.*, 6 (1995) pp. 1-15.

[10] J. Lamon, « La rupture des céramiques », *La revue de Métallurgie-CIT/Science et Génie des Matériaux,* Février 1995, pp. 265-284. http://dx.doi.org/10.1051/metal/199592020265

[11] J.J. Fernandes et al., « Effects of surface roughness on the flexural strength of a hardmetal », *J. of Mater. Sc.*, 29 (1994), pp. 2008-2012. http://dx.doi.org/10.1007/bf01154674

[12] U. Schleinkofer et al. ,« Fatigue of hard metals and cermets - the present knowledge and its technical importance and application », *Adv. in Powder Metall. & Part. Mater.*, Proc. of World Congress on Powder Metall. & Part. Mater., Washington DC, June 16-21, 1996, pp. 1885-1896.

[13] E.F. Drake et al., « Fatigue damage in a WC-Nickel cemented carbide composite », *Metall. Trans. A*, Vol. 12A, March 1981; pp. 505-513. http://dx.doi.org/10.1007/bf02648549

[14] M.V. Frandsen, « Thermal conductivity and electrical resistivity of cemented transition-metal carbides at low temperatures », *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 74 [6], 1991, pp. 1411-1416. http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1991.tb04121.x

[15] M.V. Frandsen, « Thermal conductivity and electrical resistivity of cemented transition-metal carbides at high temperatures », *J. Hard Mater.*, Vol. 1 (3), 1990, pp. 159-167.

[16] W.J. Tomlinson et al., « Corrosion, erosion-corrosion, and the flexural strength of WC -Co hardmetals », *J. Mater. Sc.*, Vol. 26, 1991, pp. 1605-1608. http://dx.doi.org/10.1007/bf00544670

[17] A. Hara et al., « Corrosion and oxidation resistance of Igetalloy », *Sumitomo Electric Technical Rev.*, Vol. 13, 1970, pp 40-51.

« Intégrations des savoirs et savoir-faire » (*S. Mottin*) // sous licence CC-BY-NC-ND