

**Carbure de tungstène cimenté**  
**Exploration complète des propriétés physiques et chimiques,**  
**des processus et des applications ( XIV )**

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Leader mondial de la fabrication intelligente pour les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## PRÉSENTATION DU GROUPE CTIA

CTIA GROUP LTD, filiale à 100 % dotée d'une personnalité juridique indépendante et créée par CHINATUNGSTEN ONLINE, se consacre à la promotion de la conception et de la fabrication intelligentes, intégrées et flexibles de matériaux en tungstène et en molybdène à l'ère de l'Internet industriel. Fondée en 1997 avec [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com) comme point de départ – le premier site web chinois de produits en tungstène de premier plan –, CHINATUNGSTEN ONLINE est une entreprise pionnière du e-commerce en Chine, spécialisée dans les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares. Fort de près de trois décennies d'expérience approfondie dans les domaines du tungstène et du molybdène, CTIA GROUP hérite des capacités exceptionnelles de conception et de fabrication de sa société mère, de ses services de qualité supérieure et de sa réputation internationale, devenant ainsi un fournisseur de solutions d'application complètes dans les domaines des produits chimiques à base de tungstène, des métaux tungstène, des carbures cémentés, des alliages haute densité, du molybdène et de ses alliages.

Au cours des 30 dernières années, CHINATUNGSTEN ONLINE a créé plus de 200 sites web professionnels multilingues sur le tungstène et le molybdène, couvrant plus de 20 langues, avec plus d'un million de pages d'actualités, de prix et d'analyses de marché liées au tungstène, au molybdène et aux terres rares. Depuis 2013, son compte officiel WeChat « CHINATUNGSTEN ONLINE » a publié plus de 40 000 informations, alimentant près de 100 000 abonnés et fournissant quotidiennement des informations gratuites à des centaines de milliers de professionnels du secteur dans le monde entier. Avec des milliards de visites cumulées sur son site web et son compte officiel, CHINATUNGSTEN ONLINE est devenu une plateforme d'information mondiale reconnue et faisant autorité pour les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares, fournissant 24 h/24 et 7 j/7 des informations multilingues, des informations sur les performances des produits, les prix et les tendances du marché.

S'appuyant sur la technologie et l'expérience de CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP s'attache à répondre aux besoins personnalisés de ses clients. Grâce à l'IA, CTIA GROUP conçoit et fabrique en collaboration avec ses clients des produits en tungstène et en molybdène présentant des compositions chimiques et des propriétés physiques spécifiques (telles que la granulométrie, la densité, la dureté, la résistance, les dimensions et les tolérances). L'entreprise propose des services intégrés complets, allant de l'ouverture du moule à la production d'essai, en passant par la finition, l'emballage et la logistique. Au cours des 30 dernières années, CHINATUNGSTEN ONLINE a fourni des services de R&D, de conception et de production pour plus de 500 000 types de produits en tungstène et en molybdène à plus de 130 000 clients dans le monde, posant ainsi les bases d'une fabrication personnalisée, flexible et intelligente. Fort de ce socle, CTIA GROUP approfondit la fabrication intelligente et l'innovation intégrée des matériaux en tungstène et en molybdène à l'ère de l'Internet industriel.

Forts de plus de 30 ans d'expérience dans le secteur, le Dr Hanns et son équipe du CTIA GROUP ont également rédigé et publié des analyses de connaissances, de technologies, de prix et de tendances du marché du tungstène, du molybdène et des terres rares, qu'ils partagent librement avec l'industrie du tungstène. Fort de plus de 30 ans d'expérience depuis les années 1990 dans le commerce électronique et le commerce international de produits en tungstène et en molybdène, ainsi que dans la conception et la fabrication de carbures cémentés et d'alliages haute densité, le Dr Han est un expert reconnu des produits en tungstène et en molybdène, tant au niveau national qu'international. Fidèle à sa volonté de fournir des informations professionnelles et de qualité à l'industrie, l'équipe du CTIA GROUP rédige régulièrement des articles de recherche technique, des articles et des rapports sectoriels basés sur les pratiques de production et les besoins des clients, ce qui lui vaut une large reconnaissance au sein du secteur. Ces réalisations apportent un soutien solide à l'innovation technologique, à la promotion des produits et aux échanges industriels du CTIA GROUP, le propulsant pour devenir un leader mondial dans la fabrication de produits en tungstène et en molybdène et dans les services d'information.



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

CTIA GROUP® | Technologie robuste, avenir intelligent

Le leader mondial des services numériques et intelligents pour les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares

Traitement personnalisé des buses en carbure cémenté

Les buses en carbure présentent des caractéristiques de résistance à l'usure, à la corrosion, aux hautes températures et une longue durée de vie. Elles sont largement utilisées dans le sablage, la pulvérisation, la découpe au jet d'eau, le forage pétrolier, l'industrie chimique, l'agriculture, l'agroalimentaire et d'autres domaines.

Principales caractéristiques des buses en carbure

Dureté : HRA 88 - 92 ; Précision : tolérance du trou de buse ±0,001 mm, rugosité de surface Ra 0,10,4 μ m .

Adaptabilité : résistance à la température 800 - 1000°C, résistance à la corrosion pH 210.

Efficacité : Prend en charge l'injection à haute pression (0,1500 MPa), avec une efficacité augmentée de 20 à 50 %.

Durée de vie : Excellente résistance à l'usure, la durée de vie est 515 fois supérieure à celle des matériaux ordinaires.

Personnalisation : différents types (sablage, atomisation, fabrication de lait en poudre, etc.), adaptés à diverses conditions de travail.

Principaux types de buses en carbure

| taper                                                         | décrire                                                                         | Principales utilisations et scénarios d'application                                                                  | Spécifications typiques mm                                       |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Buse de sablage<br>Buse de sablage                            | Conception hautement résistante à l'usure, sablage abrasif                      | Élimination de la rouille des navires, ébavurage de pièces automobiles et nettoyage du béton.                        | Diamètre de la buse 2 - 12, longueur 50 - 200                    |
| Buse à jet d'eau<br>Buse à jet d'eau                          | Jet d'eau haute pression, découpe de matériaux durs                             | Découpe de titane pour l'aérospatiale, découpe de matériaux composites pour l'automobile, traitement de la pierre.   | Le diamètre de la buse est de 0,12, la longueur est de 20 à 100, |
| Buse de pulvérisation<br>Buse de revêtement par pulvérisation | Pulvérisation précise de peinture ou de revêtements céramiques                  | Revêtement d'aubes de turbine, revêtement de moteurs, pulvérisation de circuits électroniques.                       | Le diamètre de la buse est de 0,55, la longueur est de 30 à 150, |
| Buses de champs pétrolifères<br>Buse de champ pétrolifère     | Résistance à haute pression, résistance à la corrosion, perçage au jet          | Injection de fluide de forage pétrolier, nettoyage de fond de trou, injection de boue minière.                       | Diamètre de la buse 3 - 15, longueur 50 - 150,                   |
| Buse d'atomisation<br>Buse d'atomisation                      | Pulvérisation fine par atomisation, dispersion de liquide                       | Pulvérisation de pesticides agricoles, atomisation de liquides chimiques, traitement des résiduaux environnementaux. | Le diamètre de la buse est de 0,23, la longueur est de 20 à 100, |
| Buse de combustion<br>Buse de brûleur                         | Conception résistante aux hautes températures, injection de carburant ou de gaz | Combustion de chaudière énergétique, réaction chimique à haute température, injection de four métallurgique.         | Diamètre de la buse 1 - 10, longueur 30 - 120,                   |
| Micro-buse                                                    | Trou de buse ultra-petit,                                                       | Spray de médicaments médicaux, nettoyage de                                                                          | Diamètre de la buse 0,05 -                                       |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|                                       |                                                                                                |                                                                                                                                                                                |                                                              |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Micro-buse                            | injection de haute précision                                                                   | puces électroniques, revêtement de précision aéronautique.                                                                                                                     | 0,5, longueur 10 - 50                                        |
| Buses résistantes à la corrosion      | Résistant aux acides forts, aux alcalis et aux environnements chimiques                        | Injection de solutions chimiques acides et alcalines, désulfuration et dénitrification pour la protection de l'environnement, injection d'eau de mer pour l'ingénierie marine. | Diamètre de la buse 1 - 10, longueur 30 - 150,               |
| Buse de fabrication de lait en poudre | Spécialement conçu pour le séchage par atomisation afin d'atomiser uniformément les émulsions. | Production de lait en poudre pour la transformation alimentaire, transformation de produits laitiers agricoles, en conformité avec les normes de contact alimentaire FDA/UE.   | Le diamètre de la buse est de 0,53 mm.<br>Longueur 20100 mm, |

GROUPE CTIA LTD  
3e étage, n° 25-1, Wanghai Road, Software Park II, Xiamen, 361008  
TÉL. : 05925129595 18750234579 Courriel : info@ctia.group



GROUPE CTIA LTD

Traitement personnalisé des matrices d'emboutissage en carbure cimenté

Les matrices d'emboutissage en carbure se caractérisent par leur résistance à l'usure, à la corrosion et aux hautes températures, ainsi que par leur longue durée de vie. Elles sont largement utilisées dans l'industrie automobile, l'usinage de composants électroniques, la quincaillerie, l'aérospatiale, les équipements médicaux et d'autres secteurs.

Principales caractéristiques des matrices d'emboutissage en carbure cimenté

Dureté : HRA 8892. Précision : tolérance du moule ±0,001 mm, rugosité de surface Ra 0,1 - 0,4 μm .

Adaptabilité : résistance à la température 800 - 1000°C, résistance à la corrosion pH 210.

Efficacité : prend en charge l'estampage haute fréquence, avec une efficacité augmentée de 2050 %.

Durée de vie : Excellente résistance à l'usure, la durée de vie est 515 fois supérieure à celle des moules ordinaires.

Personnalisation : Différents types (matrice d'emboutissage, matrice de poinçonnage, matrice composée, etc.), adaptés à diverses conditions de travail.

Principaux types de matrices d'emboutissage en carbure cimenté

| taper                                                  | décrire                                                                                                  | Principales utilisations et scénarios d'application                                                                | Spécifications typiques                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| matrice d'étirement<br>Matrice de dessin               | Conception hautement résistante à l'usure, adaptée au formage par étirage du métal.                      | Panneaux de carrosserie automobile, conteneurs métalliques et étirement de coques en alliage d'aluminium.          | Le diamètre de la matrice est de 10 200 mm, l'épaisseur est de 20 100 mm et la durée de vie est de 502 millions de poinçonnages.          |
| matrice de découpage<br>matrice de découpage           | Poinçonnage de haute précision, adapté à la découpe de plaques minces.                                   | Poinçonnage de cadres de connexion de composants électroniques, de pièces automobiles et d'accessoires matériels.  | L'écartement des matrices est de 0,010,1 mm, l'épaisseur est de 1580 mm et la durée de vie est de 301,5 millions de fois l'emboutissage.  |
| Moule composé<br>matrice composée                      | Emboutissage multi-étapes intégré, adapté aux pièces complexes.                                          | Connecteurs aérospatiaux, pièces d'équipement médical et traitement composite de matériel de précision.            | Le diamètre de la matrice est de 20150 mm, l'épaisseur est de 20100 mm et la durée de vie est de 401,8 millions de poinçonnages.          |
| Un champ pétrolifère meurt<br>Champ pétrolifère<br>Die | Résistant à la haute pression et à la corrosion, adapté à l'emboutissage à forte charge.                 | Pièces d'équipement de forage pétrolier, accessoires de gazoduc, pièces de machines minières.                      | Le diamètre de la matrice est de 30 200 mm, l'épaisseur est de 30 120 mm et la durée de vie est de 301,2 millions de fois d'emboutissage. |
| matrice d'emboutissage à grande vitesse                | Conception résistante aux hautes températures et aux hautes fréquences, adaptée à l'emboutissage rapide. | Fixations automobiles, connecteurs électroniques, lignes de production d'emboutissage à grande vitesse en continu. | La matrice a un diamètre de 10 100 mm, une épaisseur de 1 580 mm et une durée de vie de 602,5 millions de poinçonnages .                  |
| Modèle de charge lourde                                | Conception à haute résistance, adaptée à l'emboutissage de                                               | Pièces de machinerie lourde, structures de navires et quincaillerie de                                             | Le diamètre de la matrice est de 50 300 mm, l'épaisseur est de 30 120 mm et la                                                            |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|                                                                     |                                                                                                       |                                                                                                                                                   |                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| matrice robuste                                                     | plaques épaisses.                                                                                     | construction, emboutissage de plaques épaisses.                                                                                                   | durée de vie est de 301,2 millions de fois d'emboutissage.                                                                      |
| Micro-moisissure<br>Micro-matrice                                   | Taille ultra-petite, adaptée au micro-estampage de haute précision.                                   | Micro-pièces pour dispositifs médicaux, micro-connecteurs pour l'électronique et composants pour capteurs aéronautiques.                          | La matrice a un diamètre de 550 mm, une épaisseur de 1040 mm et une durée de vie de 20,8 millions de poinçonnages .             |
| Moule résistant à la corrosion<br>matrice résistante à la corrosion | Résistant aux acides forts et aux alcalis, adapté à l'emboutissage dans des environnements chimiques. | Pièces d'équipement chimique, accessoires d'ingénierie marine et emboutissage de matériaux corrosifs.                                             | Le diamètre de la matrice est de 15 150 mm, l'épaisseur est de 2 080 mm et la durée de vie est de 502 millions de poinçonnages. |
| Moule de qualité alimentaire<br>Matrice de qualité alimentaire      | Spécialement conçu pour l'emboutissage de pièces alimentaires, dans le respect des normes.            | Les moules d'emballage alimentaire et les pièces d'équipement de transformation laitière sont conformes aux normes de contact alimentaire FDA/UE. | Le diamètre de la matrice est de 10 100 mm, l'épaisseur est de 1 580 mm et la durée de vie est de 502 millions de poinçonnages. |

GROUPE CTIA LTD

3e étage, n° 25-1, Wanghai Road, Software Park II, Xiamen, 361008  
, 05925129595, 18750234579, e-mail : [info@ctia.group](mailto:info@ctia.group)



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GROUPE CTIA LTD

Traitement personnalisé des engrenages à billes en carbure

Les dents sphériques en carbure offrent une résistance à l'usure, à la corrosion et aux hautes températures, ainsi qu'une longue durée de vie. Elles sont largement utilisées dans les secteurs de l'exploitation minière, du creusement de tunnels, du fraisage routier, du forage pétrolier, de la construction, de l'extraction du charbon et d'autres domaines.

Principaux types de dents à billes en carbure

| taper                                                              | Description pratique                                                         | Principales utilisations et scénarios d'application                                                    | Spécifications typiques mm                 |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Pic de coupe                                                       | Conception hautement résistante à l'usure, coupe de roche dure               | Extraction de charbon, creusement de tunnels et exploitation de roches dures.                          | Diamètre de la dent 1050, longueur 50150   |
| Tunnelisation dentaire                                             | Conception à haute résistance pour les équipements de creusement de tunnels  | Métro, tunnel ferroviaire, excavation d'ingénierie souterraine.                                        | Diamètre de la dent 1560<br>Longueur 60180 |
| Dent de fraisage                                                   | Découpe haute fréquence résistante aux hautes températures, rabotage routier | Entretien des routes, fraisage des pistes, réparation des routes urbaines.                             | Diamètre de la dent 830, longueur 40120    |
| Perçage des dents                                                  | Résistant aux hautes pressions, à la corrosion et aux opérations de perçage. | Forage pétrolier, exploration de gaz naturel, étude géologique.                                        | Diamètre de la dent 1040, longueur 50140   |
| Dents de creusement rotatives<br>Dent de creusement rotative       | Conception à haute ténacité, équipement de forage rotatif                    | Construction de fondations sur pieux, de fondations de ponts, de construction de terminaux portuaires. | Diamètre de la dent 2080, longueur 70200   |
| Dent d'extraction du charbon                                       | Conception résistante aux chocs, exploitation minière du charbon             | Mines de charbon à ciel ouvert, exploitations minières souterraines, équipements de lavage du charbon. | Diamètre de la dent 1550, longueur 50160   |
| Micro-dent                                                         | Taille ultra-petite, découpe de haute précision                              | Exploration géologique de précision, micro forage, composants aéronautiques.                           | Diamètre de la dent 520, longueur 2080     |
| Dents résistantes à la corrosion<br>Dent résistante à la corrosion | Forte résistance aux acides et aux alcalis, coupe en environnement corrosif  | Exploitation minière des fonds marins, extraction minérale, ingénierie des sols acides.                | Diamètre de la dent 1050, longueur 50150   |
| Dent robuste                                                       | Conception à haute résistance, matériau ultra dur                            | Mines de roche dure, exploitation de minerai de fer, concassage technique à grande échelle.            | Diamètre de la dent 20100, longueur 80220  |

GROUPE CTIA LTD

3e étage, n° 25, Wanghai Road, Software Park II, Xiamen, 361008  
, 05925129595 18750234579

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Courriel : [info@ctia.group](mailto:info@ctia.group)



[www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com)

[www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com)

[www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com)

[www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com)

[www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com)

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)



## Partie 4 : Classification et domaines d'application du carbure cimenté

### Chapitre 14 : Applications émergentes et multifonctionnalité du carbure cimenté

Le carbure cimenté de tungstène est un matériau composite présentant une dureté, une résistance à l'usure et une ténacité élevées. Il est fabriqué par métallurgie des poudres. La phase dure est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Co) ou d'autres métaux (tels que le nickel, le Ni et le chrome, Cr). Ses composants de base sont généralement le WC (70 à 94 %), le Co (6 à 15 %), etc. Certaines formules plus complexes peuvent ajouter des éléments tels que le TiC, TaC ou Pt pour optimiser les performances. Grâce à ses excellentes propriétés physiques et chimiques, le carbure cimenté est devenu un matériau incontournable dans l'industrie moderne et les technologies émergentes.

#### 14.0 Propriétés du carbure cimenté

Les performances du carbure cimenté proviennent de sa microstructure unique et de sa conception de composition :

##### Dureté élevée

La plage de dureté est HV 1600-2500±30. Grâce à sa dureté élevée (proche de celle du diamant), le WC conserve une excellente résistance à la déformation à haute température (jusqu'à 1000 °C±20 °C).

##### Excellente résistance à l'usure

Le taux d'usure est  $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ . Sa résistance à l'usure est 10 à 20 fois

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

supérieure à celle de l'acier, ce qui le rend adapté aux environnements hautement abrasifs tels que les outils de coupe et le traitement abrasif.

#### **conductivité électrique**

La résistivité est  $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , ce qui est proche de celle des conducteurs métalliques et convient aux applications électroniques, en particulier dans les scénarios où une dissipation thermique efficace est requise.

#### **Biocompatibilité**

Le taux de survie cellulaire est  $> 95 \% \pm 2 \%$  et peut être utilisé pour une implantation in vivo après traitement de surface, montrant une faible toxicité et une bonne compatibilité tissulaire.

#### **Performances catalytiques**

Avec un courant MOR (réaction d'oxydation du méthanol) de  $> 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ , les catalyseurs à base de WC fonctionnent bien dans les piles à combustible, approchant l'efficacité catalytique du métal précieux Pt.

#### **Stabilité thermique**

Il maintient l'intégrité structurelle à  $800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$  et présente un faible coefficient de dilatation thermique (environ  $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), ce qui le rend adapté au traitement à haute température et aux dispositifs de stockage d'énergie.

#### **Résistance mécanique**

Résistance à la flexion  $600\text{-}2000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ , la dureté et la ténacité sont équilibrées en ajustant la teneur en Co.

Français Les performances du carbure cimenté ont été considérablement améliorées grâce à l'optimisation de la composition (par exemple, Co 6%-15%±1% pour contrôler la ténacité, Pt 0,5%-2%±0,1% pour améliorer les performances catalytiques), la modification de surface (par exemple, une épaisseur de revêtement PVD/CVD de  $15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  pour améliorer la résistance à la corrosion) et des procédés de fabrication avancés (par exemple, la fusion laser sélective SLM, une puissance laser de  $200\text{-}400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ ). Par exemple, la conductivité est augmentée d'environ 20%±3%, l'efficacité catalytique est augmentée d'environ 30%±5% et la porosité est réduite à  $< 2\% \pm 0,1\%$ , jetant les bases d'applications multifonctionnelles.

### **14.0 Application multifonctionnelle du carbure cimenté**

Le carbure cimenté a démontré sa polyvalence dans les domaines émergents. Grâce à ses performances supérieures (dureté élevée HV  $1600\text{-}2000 \pm 30$ , résistance à la compression  $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , conductivité électrique et résistivité  $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , résistance à la corrosion et taux de corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), il est largement utilisé dans des domaines de pointe tels que l'électronique, la biomédecine, le stockage d'énergie catalytique et la fabrication additive. De plus, grâce à une recherche approfondie et aux dernières tendances du secteur, l'application multifonctionnelle du carbure cimenté s'est étendue à d'autres domaines, notamment, mais sans s'y limiter, aux aspects suivants. Ce chapitre part de cinq aspects, analysant systématiquement ses applications et ses tendances de développement, et fournissant une base théorique et pratique pour les sections suivantes.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Pièces électroniques et conductrices en carbure cémenté

La conductivité électrique et la stabilité thermique élevées du carbure cémenté (résistance à des températures allant jusqu'à  $800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en font un choix idéal pour les moules électroniques, les substrats de dissipation thermique et les matériaux de contact électrique, notamment dans les boîtiers de semi-conducteurs (cadres de connexion de puces), les équipements 5G (supports d'antennes haute fréquence) et les connecteurs de batteries de véhicules électriques. Selon des données en ligne, le carbure cémenté (tel que le WC-Ni) est utilisé dans les outils de traitement microélectronique et les forets pour circuits imprimés ultra-haute densité en raison de sa faible résistivité ( $< 8\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) et de son excellente résistance à l'oxydation ( $< 0,01\text{ }\% \pm 0,001\text{ }\%$ ), répondant aux exigences de haute précision et de durabilité des stations de base 5G (débits de transmission de données  $> 10\text{ Gbit/s} \pm 1\text{ Gbit/s}$ ) et des dispositifs informatiques quantiques (température de fonctionnement  $< 4\text{ K} \pm 0,5\text{ K}$ ). De plus, les composites à base de WC combinés au graphène ( $0,2\%-1\% \pm 0,01\%$ ) ont une conductivité améliorée ( $> 150\text{ S/cm} \pm 5\text{ S/cm}$ ) et émergent dans l'électronique flexible (comme les capteurs portables, flexibilité  $> 90\% \pm 2\%$ ) et le blindage électromagnétique (efficacité de blindage  $> 90\text{ dB} \pm 2\text{ dB}$ ).

## Applications biomédicales du carbure cémenté

La biocompatibilité (cytotoxicité  $< 5\text{ }\% \pm 1\text{ }\%$ ), la résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) et la dureté élevée du carbure cémenté soutiennent le développement d'implants (tels que les prothèses de hanche et de genou) et d'outils chirurgicaux (tels que les scies et forets à os), combinés à une technologie de modification de surface (telle que le revêtement en hydroxyapatite, épaisseur  $5\text{-}10\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$ ), pour répondre aux exigences de haute précision ( $< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ ) et de stabilité à long terme ( $> 10\text{ ans} \pm 1\text{ an}$ ) des dispositifs médicaux. Français Selon les données en ligne, le WC-Co est de plus en plus utilisé dans les implants dentaires (taux d'intégration osseuse  $> 95\text{ }\% \pm 2\text{ }\%$ ) et les fixateurs rachidiens (résistance à la fatigue  $> 1\text{ }200\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ ), et la nitruration de surface (teneur en N  $1\text{ }\%-2\text{ }\% \pm 0,1\text{ }\%$ ) améliore les propriétés antibactériennes (taux antibactérien  $> 90\text{ }\% \pm 2\text{ }\%$ ). De plus, les matériaux à base de WC ont montré un potentiel dans les biocapteurs (sensibilité  $> 10^3 \pm 10^2$ ) et les échafaudages d'ingénierie tissulaire (porosité  $20\text{ }\%-30\text{ }\% \pm 1\text{ }\%$ ) en raison de leur surface spécifique élevée ( $> 50\text{ m}^2/\text{g} \pm 5\text{ m}^2/\text{g}$ ) et de leur bioactivité (taux d'attachement cellulaire  $> 85\text{ }\% \pm 2\text{ }\%$ ).

## Catalyse et stockage d'énergie du carbure cémenté

Les performances catalytiques des composites WC-Pt (courant MOR  $> 450\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$ ) sont excellentes dans les piles à combustible (densité de puissance  $> 1\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$ ) et les électrolyseurs (production d'hydrogène  $> 1\text{ L/min} \pm 0,1\text{ L/min}$ ), favorisant le développement de technologies énergétiques propres, en particulier dans l'économie de l'hydrogène (marché mondial  $> 200\text{ milliards de dollars US} \pm 20\text{ milliards de dollars US}$ , 2025) avec un grand potentiel. Français Les données de recherche montrent que les matériaux à base de carbure de tungstène (WC) ont été

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appliqués dans les supercondensateurs (capacité spécifique  $> 200 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ ), les anodes de batteries lithium-ion (capacité spécifique  $> 500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ ) et l'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène (courant OER  $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ), et le dopage WC-Mo (Mo  $1\% - 3\% \pm 0,1\%$ ) améliore l'efficacité de l'OER (courant  $> 350 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ). De plus, l'activité catalytique des matériaux à base de carbure de tungstène (WC) dans la réduction du  $\text{CO}_2$  (taux de conversion  $> 80\% \pm 2\%$ ) et la synthèse d'ammoniac (rendement  $> 100 \text{ mg/h} \cdot \text{g} \pm 10 \text{ mg/h} \cdot \text{g}$ ) a attiré l'attention en raison de sa structure multiphasée et de sa grande stabilité (résistance à la corrosion  $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), soutenant l'objectif de neutralité carbone (émissions nettes nulles en  $2040 \pm 5$  ans).

### Fabrication additive de carbure cémenté

Grâce aux technologies d'impression 3D telles que SLM et Binder Jetting, le carbure cémenté peut réaliser une production personnalisée de formes géométriques complexes (précision  $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ), qui est utilisée dans l'aérospatiale (aubes de turbine, résistance à haute température  $> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ), la fabrication de moules (moules d'emboutissage résistants à l'usure, durée de vie  $> 10^6 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ ) et les équipements énergétiques (vannes haute température, pression  $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ), améliorant considérablement la flexibilité de fabrication (vitesse d'impression  $> 100 \text{ mm}^3/\text{s} \pm 10 \text{ mm}^3/\text{s}$ ). Français Selon les informations sur l'ensemble du réseau, les technologies DED et EBM sont utilisées pour la réparation de grandes pièces structurales (résistance de l'interface  $> 800 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) et la fabrication de matériaux à gradient (teneur en Co  $6\% - 15\% \pm 1\%$  de changement de gradient), et la résistance à la traction des matériaux composites WC-TiC dans un environnement à haute température ( $> 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) est  $> 1300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ . La fabrication additive s'est également étendue aux micro-nano dispositifs (taille des caractéristiques  $< 10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) et à la bio-impression (porosité de l'échafaudage  $20\% - 40\% \pm 1\%$ ), favorisant la médecine personnalisée et la conception de structures légères.

### Carbure cémenté pour applications de défense et d'environnements extrêmes

Les carbures cémentés sont de plus en plus utilisés dans la défense et les environnements extrêmes. Le WC-Co est utilisé dans les ogives pénétrantes (profondeur de pénétration  $> 500 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$ ) et les blindages balistiques (niveau de protection NIJ IV  $\pm 1$ ) en raison de sa dureté élevée (HV 1800  $\pm 30$ ) et de sa résistance aux chocs (ténacité aux chocs  $> 20 \text{ J/cm}^2 \pm 2 \text{ J/cm}^2$ ). Les composites WC-TiC - WN maintiennent leur intégrité structurale (déformation résiduelle  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ ) à des vitesses de déformation élevées ( $> 10^3 \text{ s}^{-1} \pm 10^2 \text{ s}^{-1}$ ).

Dans les équipements sous-marins (pression  $> 1000 \text{ bar} \pm 100 \text{ bar}$ ) et la technologie spatiale (vide  $< 10^{-6} \text{ Pa} \pm 10^{-7} \text{ Pa}$ , température  $-150^\circ\text{C}$  à  $200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), les matériaux à base de carbure de tungstène (WC) sont utilisés comme joints et revêtements de protection thermique (résistance à la chaleur  $> 1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) en raison de leur faible coefficient de dilatation thermique ( $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) et de leur résistance à la corrosion ( $< 0,005 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ). De plus, le WC présente un potentiel multifonctionnel en tant que matériau de blindage et matériau cible dans

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'industrie nucléaire (tolérance aux radiations  $> 10^6 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$ ) et dans les expériences de physique des hautes énergies (stabilité du faisceau de particules  $> 99\% \pm 0,5\%$ ).

### Fabrication intelligente et application de capteurs en carbure cimenté

Le carbure cimenté, associé à une technologie de fabrication intelligente, s'est étendu au domaine des capteurs et de l'Internet des objets. Selon des données en ligne, les matériaux à base de WC sont utilisés dans les capteurs de pression (sensibilité  $> 10^2 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ ), les capteurs de température (temps de réponse  $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ ) et les moniteurs de vibrations (gamme de fréquences  $10 \text{ Hz}-10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$ ) en raison de leur conductivité élevée ( $> 100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ) et de leur stabilité mécanique (résistance à la compression  $> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ). Des nanorevêtements intégrés (tels que  $\text{SiO}_2$ , épaisseur  $5-10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ) améliorent l'adaptabilité environnementale (humidité  $50\%-95\% \text{ HR} \pm 5\% \text{ HR}$ ). Dans l'Industrie 4.0, les outils intelligents à base de WC (durée de vie d'autodiagnostic  $> 10^5 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ ) peuvent réaliser une surveillance en temps réel (précision  $\pm 1\%$ ) grâce à des capteurs intégrés, optimiser le traitement de coupe (taux d'usure de l'outil  $< 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ) et ajuster les paramètres d'impression 3D.

Ce chapitre se penchera sur des cas d'application spécifiques, des défis techniques et des perspectives d'avenir dans ces domaines, révélant comment le carbure cimenté peut répondre à des besoins industriels de plus en plus diversifiés grâce à la multifonctionnalité.



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)



#### 14.1 Composants électroniques et conducteurs en carbure cimenté

Dans le domaine de l'électronique, le carbure cimenté a suscité un vif intérêt en raison de sa dureté élevée ( $HV\ 1800-2200\pm30$ ), de sa faible résistivité ( $<10\ \mu\Omega\cdot cm\pm0,1\ \mu\Omega\cdot cm$ ), de son excellente conductivité thermique ( $>100\ W/m\cdot K\pm5\ W/m\cdot K$ ) et de sa stabilité thermique remarquable (température de fonctionnement pouvant atteindre  $800\ ^\circ C\pm50\ ^\circ C$ ). Il est principalement utilisé dans les moules et les substrats de dissipation thermique. Les moules sont utilisés pour l'encapsulation de puces, l'emboutissage de précision et l'usinage de composants microélectroniques, avec une durée de vie allant jusqu'à  $10^6$  fois  $\pm 10^5$  fois ; Les substrats de dissipation thermique prennent en charge les dispositifs électroniques de haute puissance (tels que les modules d'alimentation, les LED et les composants de station de base 5G), avec une efficacité de dissipation thermique supérieure à  $90\ %\pm 2\ %$  et un faible coefficient de dilatation thermique (environ  $5\times 10^{-6}/^\circ C\pm 0,5\times 10^{-6}/^\circ C$ ), garantissant une stabilité dimensionnelle pendant les cycles thermiques. Le matériau est principalement basé sur le système WC-Co (la teneur en Co du carbure cimenté est de  $6\ %\text{ à }12\ %\pm 1\ %$ ), la granulométrie des matières premières en carbure cimenté est contrôlée à  $0,5-2\ \mu m\pm 0,01\ \mu m$ , et la conductivité électrique et thermique est optimisée par dopage au Cu ( $1\ %\text{ à }5\ %\pm 0,5\ %$ ) ou au Ni ( $2\ %\text{ à }8\ %\pm 0,5\ %$ ). Certaines formules haut de gamme ajoutent du Pt ( $0,5\ %\text{ à }2\ %\pm 0,1\ %$ ) pour améliorer les propriétés catalytiques et conductrices. Le point de fusion élevé du carbure cimenté (environ  $2870\ ^\circ C\pm 20\ ^\circ C$ ) lui confère une excellente durabilité dans les environnements extrêmes, et sa résistance à la corrosion (indice de résistance à la corrosion  $> 90\ %\pm 2\ %$  obtenu par dépôt PVD) élargit encore son champ d'application. En 2025, avec l'évolution de l'industrie électronique vers la haute fréquence, la haute puissance et la miniaturisation, la demande en carbure cimenté pour la fabrication de semi-conducteurs, la gestion de l'énergie des véhicules électriques et les appareils intelligents continuera de croître.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dans l'industrie électronique, le carbure cimenté est largement utilisé dans la fabrication de moules et de substrats de dissipation thermique en raison de son excellente dureté (HV 1600-2000±30), de sa résistance à l'usure (taux d'usure < 0,05 mm<sup>3</sup> / N·m ± 0,01 mm<sup>3</sup> / N·m), de sa conductivité thermique élevée (conductivité thermique > 100 W/m·K±5 W/ m·K ) et de sa résistance aux températures élevées (résistance à la température > 800 °C±50 °C). Ces caractéristiques lui permettent d'être performant dans l'usinage de précision et les scénarios de dissipation thermique efficace, en particulier dans les domaines des semi-conducteurs, de la technologie 5G et des véhicules électriques. Avec la demande croissante de miniaturisation et d'intégration haute densité des dispositifs électroniques, les perspectives d'application du carbure cimenté dans l'industrie électronique continuent de s'élargir.

#### 14.1.1 Moules en alliage dur pour l'industrie électronique

Les moules en carbure cimenté pour l'industrie électronique sont utilisés pour l'usinage de précision des composants électroniques. Ils doivent présenter une grande précision (écart d'usinage < 0,01 mm ± 0,001 mm), une excellente résistance à la corrosion (taux de corrosion < 0,01 mm/an ± 0,001 mm/an) et une longue durée de vie (> 10<sup>6</sup> fois ± 10<sup>4</sup> fois) pour répondre aux exigences élevées de la fabrication de dispositifs microélectroniques. Le matériau utilisé est principalement un système WC-Co (teneur en Co de 6 % à 10 % ± 1 %), et la granulométrie des matières premières en carbure cimenté est contrôlée à 0,5-1 µm ± 0,01 µm . Certains revêtements de surface (tels que le TiN , épaisseur 5-15 µm ± 0,1 µm ) ou le CrN (épaisseur 10-20 µm ± 0,2 µm ) sont utilisés pour améliorer la résistance à l'usure et à l'oxydation. Le moule est optimisé par pressage isostatique à chaud (HIP, 1200 °C ± 10 °C, 150 MPa ± 1 MPa) ou par traitement de surface laser.

Dans l'industrie électronique, les moules en carbure cimenté sont devenus un outil essentiel dans la fabrication de composants électroniques grâce à leur excellente dureté (HV 1600-2000±30), leur résistance à l'usure (taux d'usure < 0,05 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0,01 mm<sup>3</sup>/N·m ) , leur résistance élevée à la chaleur (température > 800 °C ± 50 °C), leur excellente précision et leurs excellentes conductivité et résistance à la corrosion. Avec le développement rapide de l'industrie électronique vers l'ultra-miniaturisation, les hautes performances, l'intelligence, l'écologie et la multifonctionnalité, les applications des moules en carbure cimenté se sont considérablement élargies et la demande du marché n'a cessé de croître. Ces moules ont été rapidement mis à jour grâce à des itérations technologiques continues, à l'optimisation de la formulation des matériaux et à l'innovation de procédés de fabrication avancés (tels que la fabrication additive , le traitement de surface de précision et les technologies de surveillance intelligente), devenant ainsi l'un des secteurs de consommation haut de gamme les plus importants et à la croissance la plus rapide de l'industrie du carbure cimenté. Les moules en carbure cimenté sont largement utilisés dans la fabrication de semi-conducteurs, les technologies électroniques flexibles, les communications 5G/6G, l'électronique grand public, l'électronique automobile pour les nouvelles énergies, les équipements de l'Internet des objets (IoT) et les domaines émergents tels que l'informatique quantique et les équipements médicaux intelligents. Le marché devrait atteindre 5 milliards de dollars US, soit ± 500 millions de dollars US, avec un taux de croissance annuel de 15 à 20 %, ce qui reflète pleinement sa position

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

clé dans la promotion du progrès technologique et de la modernisation industrielle du secteur électronique.

### (1) Matrice de poinçonnage pour cadre en carbure de plomb

#### Qu'est-ce qu'une matrice de poinçonnage de cadre en carbure de plomb ?

Les matrices de poinçonnage pour grilles de connexion en carbure sont des outils de haute précision spécialement conçus pour le conditionnement des semi-conducteurs. Elles sont principalement utilisées pour le formage des broches de circuits intégrés, le traitement des supports de LED, le formage des fils de modules de puissance et la fabrication de nouveaux fils de microcapteurs. Leur matériau de base est de formule WC-8Co, et la granulométrie est contrôlée avec précision à  $0,6 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ . Elles sont préparées par métallurgie des poudres et pressage isostatique à chaud (HIP,  $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $150 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) pour garantir l'uniformité du matériau et une densité élevée (porosité  $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$ ). Le revêtement TiN (épaisseur  $5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) est appliqué sur la surface du moule grâce à la technologie de dépôt physique en phase vapeur (PVD), ce qui réduit considérablement le coefficient de frottement ( $< 0,2 \pm 0,02$ ), améliore la résistance à l'oxydation (température durable jusqu'à  $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) et réduit l'adhérence, améliorant efficacement la durabilité (jusqu'à  $1,2 \times 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois) et la précision du découpage ( $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ). En combinant le micro-usinage laser, le revêtement multicouche (tel que TiAlN ou TiSiN, épaisseur  $10-15 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ ) et la technologie de refroidissement adaptatif, le moule est encore optimisé pour prendre en charge les fils ultra-fins (largeur  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), la stabilité haute fréquence ( $> 10 \text{ GHz} \pm 1 \text{ GHz}$ ) et la résistance au cycle thermique ( $-40^\circ\text{C}$  à  $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), et grâce à la technologie du jumeau numérique, la surveillance de l'usure en temps réel (précision  $\pm 1\%$ ) et l'optimisation des paramètres sont obtenues pour répondre aux besoins de production de très haute précision et à très grande échelle.

#### Performances des matrices de poinçonnage à cadre en carbure

Français Le moule présente une dureté élevée ( $\text{HV } 1800 \pm 30$ ), une excellente résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), une durabilité élevée ( $> 1,2 \times 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois) et une précision de poinçonnage extrêmement élevée ( $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ). Le revêtement TiN réduit considérablement le frottement ( $< 0,2 \pm 0,02$ ), améliore la résistance à l'oxydation (résistant à  $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) et améliore la stabilité du cycle thermique ( $-40^\circ\text{C}$  à  $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) grâce à un revêtement multicouche (tel que TiAlN, résistant à la chaleur  $> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) et à une technologie de refroidissement adaptatif. De plus, l'intégration du jumeau numérique permet de prédire l'usure (erreur  $< 5\% \pm 0,5\%$ ) et d'optimiser le processus.

#### Types de matrices de poinçonnage pour cadres en carbure

##### Moule standard

Basé sur WC-8Co, il convient au traitement conventionnel des broches IC et des supports LED,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

avec une précision de  $<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$  et une durabilité de  $1 \times 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois.

#### **Moule à haute température**

Ajout de TiC ( $5\%-10\% \pm 0,5\%$ ) et revêtement TiAlN ( $10-15 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ ), résistance à la chaleur  $> 800^\circ \text{C} \pm 50^\circ \text{C}$ , adapté aux modules de puissance tels que les emballages IGBT.

#### **Moule ultra-fin**

La taille de grain optimisée ( $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et le micro-usinage laser prennent en charge une largeur de fil  $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , répondant aux exigences du processus 5 nm/3 nm et de la micro LED.

#### **Moule intelligent**

Les capteurs intégrés et les modules jumeaux numériques surveillent l'usure (précision  $\pm 1\%$ ) et ajustent les paramètres en temps réel pour les applications haute fréquence ( $>10 \text{ GHz} \pm 1 \text{ GHz}$ ).

### **Application des matrices de poinçonnage pour cadres en carbure**

Les matrices de poinçonnage en carbure pour grilles de connexion sont largement utilisées dans de nombreux domaines de haute technologie, jouant notamment un rôle clé dans les industries des semi-conducteurs et de l'électronique. Dans la production de circuits intégrés haute densité, comme les puces de 5 nm et 3 nm, ces matrices garantissent une précision et une homogénéité exceptionnelles des grilles de connexion, permettant la production en série de processeurs et de mémoires haut de gamme. Dans le domaine du conditionnement des semi-conducteurs de puissance, ces matrices sont utilisées pour la production de modules IGBT, de MOSFET et de composants de puissance SiC et GaN, afin de répondre aux exigences de fiabilité élevées des véhicules électriques, des onduleurs photovoltaïques et des entraînements de moteurs industriels. Le conditionnement des micro-LED est un autre domaine d'application important. La technologie de poinçonnage haute précision des matrices permet la fabrication de composants optiques pour micro-écrans et appareils portables, améliorant ainsi la luminosité et la résolution des écrans.

De plus, les moules sont largement utilisés dans la fabrication de nouveaux microcapteurs, notamment les capteurs MEMS (microsystèmes électromécaniques), les capteurs de pression et les unités de mesure inertielle (IMU), offrant un support essentiel aux appareils intelligents, aux nœuds IoT et à l'électronique médicale. Dans le domaine de l'électronique automobile, notamment pour le conditionnement de puces de conduite autonome, de modules radar et d'unités de calcul embarquées, la résistance aux cycles thermiques du moule ( $-40^\circ \text{C}$  à  $150^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ ) et sa stabilité haute fréquence ( $> 10 \text{ GHz} \pm 1 \text{ GHz}$ ) garantissent la stabilité et la sécurité à long terme des systèmes électroniques. Les puces de calcul haute performance et les dispositifs informatiques quantiques s'appuient également sur les capacités de traitement du plomb ultrafin du moule (largeur  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), favorisant le développement d'accélérateurs d'intelligence artificielle et de circuits de contrôle de bits quantiques.

Dans le secteur de l'électronique grand public, les moules permettent l'usinage de grilles de connexion multicouches pour smartphones, tablettes et consoles de jeu, améliorant ainsi la finesse et les performances des produits. En automatisation industrielle, les moules sont associés à une

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

technologie de fabrication intelligente pour la production en série de pièces mécaniques et de connecteurs de précision, optimisant ainsi l'efficacité de la production (augmentation de  $> 20 \% \pm 2 \%$ ). Grâce à la technologie des jumeaux numériques, les moules permettent une maintenance prédictive et une optimisation des paramètres de processus, réduisent les temps d'arrêt (diminution de  $> 15 \% \pm 2 \%$ ) et sont adaptés aux exigences environnementales extrêmes de l'électronique aérospatiale (comme les modules de communication par satellite) et de l'électronique de défense (comme les radars et les systèmes de guidage de missiles), élargissant ainsi leur champ d'application.

## (2) Moule d'emballage de copeaux de carbure

### Qu'est-ce qu'un moule d'emballage de copeaux de carbure ?

Les moules d'encapsulation de puces en carbure sont des outils d'usinage de haute précision spécialement conçus pour le domaine de l'encapsulation de dispositifs microélectroniques. Ils sont principalement utilisés pour les BGA (Ball Grid Array), les QFN (Quad Flat No-Lead Package), les SIP (System-in-Package), l'empilement de circuits intégrés 3D et l'encapsulation au niveau de la tranche (WLP). Leur matériau de base est le WC-6Co, avec une granulométrie précise de  $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ . Ils atteignent une densité élevée (porosité  $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$ ) grâce à des procédés de broyage à billes et de frittage de poudre ultrafine, et sont compatibles avec des conceptions géométriques complexes (largeur des microcanaux de  $0,02 \text{ à } 0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , profondeur de  $0,1 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ , verticalité des parois latérales  $< 1^\circ \pm 0,1^\circ$ ). Un revêtement CrN (épaisseur de  $10 \text{ à } 15 \mu\text{m}$ ) Français  $\pm 0,2 \mu\text{m}$ , utilisant la technologie de placage ionique multi-arc) est appliqué sur la surface du moule pour améliorer considérablement la résistance à la corrosion (taux de corrosion  $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) et la résistance aux hautes températures ( $> 350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), prolongeant efficacement la durée de vie (environ  $8 \times 10^5 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ ). Les structures complexes (telles que les canaux de refroidissement internes) sont personnalisées en combinant des revêtements PVD (tels que AlTiN ou ZrN, d'une épaisseur de  $15 \text{ à } 20 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ ) et une technologie de fabrication additive (telle que la fusion laser sélective SLM). Le moule est en outre optimisé pour prendre en charge une densité d'emballage élevée ( $> 1\,000 \text{ I/O} \pm 50 \text{ I/O}$ ), une contrainte de cyclage thermique ( $> 5\,000 \text{ fois} \pm 500 \text{ fois}$ ) et des processus d'emballage à faible contrainte. La surveillance en temps réel de la distribution des contraintes et des changements de température (précision  $\pm 1 \%$ ) est réalisée grâce à une technologie de capteur intégrée, qui améliore les capacités de gestion thermique (conductivité thermique  $> 120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) et le rendement de conditionnement ( $> 98 \% \pm 1 \%$ ) pour répondre aux besoins de miniaturisation et de haute fiabilité.

### Performances du moule d'emballage de copeaux de carbure

Français Le moule a une dureté élevée (HV  $1800 \pm 30$ ), une excellente résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), une durabilité élevée ( $> 8 \times 10^5 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ ) et une précision géométrique extrêmement élevée (largeur du microcanal  $0,02\text{-}0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , verticalité des parois latérales  $< 1^\circ \pm 0,1^\circ$ ). Le revêtement CrN réduit considérablement le taux de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corrosion ( $<0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) et améliore la résistance aux hautes températures ( $>350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), tandis que le revêtement multicouche AlTiN ou ZrN améliore encore la stabilité du cycle thermique (résistance à  $>5000 \text{ fois} \pm 500 \text{ fois}$ , résistance à la chaleur  $>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ). Le processus de fabrication additive optimise les canaux de refroidissement internes et améliore la gestion thermique (conductivité thermique  $> 120 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ), et l'intégration de capteurs permet la surveillance des contraintes (erreur  $< 5 \% \pm 0,5 \%$ ) et l'optimisation du processus.

## Types de moules d'emballage de copeaux de carbure

### Moule standard

Basé sur un revêtement WC-6Co et CrN, il convient aux boîtiers BGA et QFN conventionnels, avec une précision de  $0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$  et une durabilité de  $8 \times 10^5 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ .

### Moule à haute température

Ajout de TiC ( $5\%-10\% \pm 0,5\%$ ) et revêtement AlTiN ( $15-20 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ ), résistance à la chaleur  $> 600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ , adapté à l'empilement SIP et 3D IC.

### Moule miniaturisé

Grains optimisés ( $<0,4 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et technologie SLM pour supporter les microcanaux (largeur  $<0,02 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) pour répondre aux besoins des puces WLP et neuromorphiques.

### Moule intelligent

Les capteurs intégrés et les modules de surveillance en temps réel optimisent la répartition des contraintes (précision  $\pm 1\%$ ) et la gestion thermique pour les emballages haute densité ( $>1000 \text{ E/S} \pm 50 \text{ E/S}$ ).

## Application du moule d'emballage de puces en carbure cémenté

Les moules d'encapsulation de puces en carbure sont largement utilisés dans de nombreux domaines de pointe de l'encapsulation de dispositifs microélectroniques. Dans l'encapsulation de circuits intégrés haute densité, le moule prend en charge les technologies BGA, QFN et WLP, répondant aux exigences de haute précision des puces de  $5 \text{ nm}$  et moins, des accélérateurs d'intelligence artificielle et des mémoires (précision  $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ). Dans l'empilement de circuits intégrés 3D et le SIP (encapsulation système), la conception géométrique complexe et les capacités de gestion thermique du moule (conductivité thermique  $> 120 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) favorisent le développement de modules multipuces et l'intégration hétérogène, et sont largement utilisés dans les modules d'informatique de pointe, les serveurs hautes performances et le matériel de centre de données.

Dans le domaine de l'électronique grand public, les moules sont utilisés pour le conditionnement miniaturisé des téléphones portables à écran pliable et des appareils portables (tels que les montres connectées). Ils garantissent la précision des microcanaux (largeur  $0,02-0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) et la résistance aux cycles thermiques ( $> 5000 \text{ fois} \pm 500 \text{ fois}$ ), améliorant ainsi la fiabilité et la durée de vie des écrans flexibles et des appareils portables. Le conditionnement des puces neuromorphiques et des dispositifs informatiques quantiques repose également sur la très haute précision et le faible stress des moules pour soutenir la conception miniaturisée des nouvelles architectures informatiques.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'électronique automobile est un autre domaine d'application important. Les moules permettent le conditionnement de puces de systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS), de modules radar et d'unités de calcul embarquées, s'adaptant à des plages de températures extrêmes ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $150\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) et à des exigences de fiabilité élevées (rendement  $> 98\% \pm 1\%$ ). En automatisation industrielle, les moules sont utilisés pour le conditionnement de capteurs et d'actionneurs de précision afin d'améliorer les performances et la stabilité des équipements de fabrication intelligents. L'électronique aérospatiale (comme les modules de communication par satellite) et de défense (comme les radars et les systèmes de guidage de missiles) utilise la résistance à la corrosion ( $< 0,008\text{ mm/an} \pm 0,001\text{ mm/an}$ ) et la stabilité à haute température ( $> 350\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) des moules pour répondre aux exigences d'une utilisation à long terme dans des environnements extrêmes.

Grâce à l'intégration de capteurs et à la technologie des jumeaux numériques, le moule permet une maintenance prédictive (réduction des temps d'arrêt de  $> 15\% \pm 2\%$ ) et une optimisation des paramètres de processus, ce qui le rend adapté à la production de masse (amélioration de l'efficacité de  $> 20\% \pm 2\%$ ) et aux scénarios de densité d'emballage ultra-élevée ( $> 1\,000\text{ E/S} \pm 50\text{ E/S}$ ), élargissant encore son potentiel d'application dans la future technologie microélectronique.

### (3) Matrice de poinçonnage pour circuits imprimés en carbure

#### Qu'est-ce qu'une matrice de poinçonnage de circuit imprimé en carbure ?

Les matrices de poinçonnage en carbure pour circuits imprimés sont des outils de haute précision spécialement conçus pour le traitement des PCB. Elles sont principalement utilisées pour les cartes multicouches, les cartes HDI (interconnexion haute densité), les circuits imprimés flexibles FPC, les cartes flexo-rigides et les nouveaux circuits imprimés à ondes millimétriques haute fréquence. Leur matériau de base est le WC-TiC-8Co ( $\text{TiC } 3\% \pm 0,5\%$ ), avec une granulométrie de  $0,8\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ . Elles sont frittées à haute température ( $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) et traitées thermiquement pour améliorer leur résistance à la fatigue à haute température (durée de vie  $> 10^7$  fois  $\pm 10^5$  fois). Le revêtement laser (épaisseur de la couche de revêtement  $20\text{-}30\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$ , utilisant de la poudre WC-Co) permet de réparer les bords usés, garantissant ainsi une précision de poinçonnage inférieure à  $0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ . Le moule prend en charge le poinçonnage à grande vitesse ( $> 100$  fois/seconde  $\pm 10$  fois/seconde), l'alignement intercouche complexe (écart  $< 0,005\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ ) et le traitement des micro-trous (diamètre  $0,1\text{-}0,2\text{ mm} \pm 0,005\text{ mm}$ ), et optimise la durabilité ( $> 1,5 \times 10^7$  fois  $\pm 10^5$  fois) et la conductivité (résistivité  $< 10\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) grâce à des structures composites multi-matériaux (telles que WC- TiC-TaC ou WC-Co-Cr). De plus, le moule introduit un nano-revêtement (tel que WC/C, épaisseur  $5\text{-}10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ ) pour améliorer les performances anti-adhérence (coefficient de frottement  $< 0,2 \pm 0,02$ ) et adopte une structure bionique (telle qu'un support interne en nid d'abeille) pour améliorer la résistance aux chocs ( $> 500\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ ), optimise le chemin de poinçonnage grâce à l'algorithme d'IA, réduit le gaspillage de matériaux ( $< 2\% \pm 0,5\%$ ) et répond aux besoins de traitement de circuits imprimés hautes performances.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Performances des matrices de poinçonnage pour circuits imprimés en carbure

Français Le moule a une dureté élevée (HV 1800±30), une excellente résistance à l'usure (taux d'usure  $<0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), une durabilité élevée ( $>1,5 \times 10^7$  fois  $\pm 10^5$  fois) et un poinçonnage de haute précision ( $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ). La technologie de revêtement laser répare les bords usés et maintient la précision du traitement des micro-trous (diamètre 0,1-0,2 mm  $\pm 0,005 \text{ mm}$ ), tandis que les nano-revêtements (tels que WC/C) réduisent le coefficient de frottement ( $<0,2 \pm 0,02$ ) et améliorent la résistance à l'oxydation à haute température ( $>900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ). La structure composite multi-matériaux optimise la conductivité (résistivité  $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ), la structure bionique améliore la résistance aux chocs ( $>500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) et l'optimisation de l'algorithme d'IA réduit le gaspillage de matériaux ( $<2\% \pm 0,5\%$ ), ce qui améliore la résistance à la fatigue à haute température dans son ensemble (durée de vie en fatigue  $>10^7$  fois  $\pm 10^5$  fois).

## Types de matrices de poinçonnage pour circuits imprimés en carbure

### Moule standard

Basé sur WC-TiC-8Co, il convient au poinçonnage de cartes multicouches et de FPC, avec une précision de  $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$  et une durabilité de  $1 \times 10^7$  fois  $\pm 10^5$  fois.

### Moule à haute température

En ajoutant du TaC (2%-5%  $\pm 0,5\%$ ) et une structure composite WC-Co-Cr, il présente une résistance à la chaleur de  $>900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$  et convient aux circuits imprimés à ondes millimétriques haute fréquence.

### Moule à micro-trous

Optimiser le revêtement laser (épaisseur 20-30  $\mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ ) et le traitement des micro-trous (diamètre  $<0,1 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ ) pour répondre aux besoins des cartes HDI.

### Moule intelligent

Intégré à des algorithmes d'IA et à des structures bioniques (support en nid d'abeille), il optimise en temps réel le chemin de perforation (précision  $\pm 0,5\%$ ) et la résistance aux chocs ( $>600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ).

## Application des matrices de poinçonnage pour circuits imprimés en carbure

Les matrices de poinçonnage en carbure pour circuits imprimés sont largement utilisées dans de nombreux domaines clés du traitement des PCB. Pour la fabrication de cartes multicouches et de cartes HDI (interconnexion haute densité), la haute précision de poinçonnage ( $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) et l'alignement complexe des couches (écart  $<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) des matrices répondent aux exigences de câblage haute densité des smartphones, tablettes et cartes mères de serveurs. Pour le traitement des circuits imprimés flexibles (FPC) et des cartes flexo-rigides, la résistance aux températures élevées ( $>900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) et à la fatigue ( $>10^7$  fois  $\pm 10^5$  fois) des matrices répond aux exigences de miniaturisation des téléphones à écran pliable, des appareils portables et des écrans flexibles.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La production de nouvelles cartes de circuits imprimés à ondes millimétriques haute fréquence repose sur la conductivité du moule (résistivité  $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) et sur ses capacités de traitement des micro-trous (diamètre  $0,1-0,2 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ ). Elle est largement utilisée dans les stations de base 5G, les modules d'antenne et les systèmes radar. Dans le domaine de l'électronique automobile, les moules permettent la production en série de circuits imprimés pour systèmes de gestion de batterie (BMS), systèmes de divertissement embarqués et systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS), s'adaptant aux environnements à haute température ( $> 900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) et aux exigences de fiabilité élevées (rendement  $> 98\% \pm 1\%$ ). La production de cartes de contrôle d'appareils électroménagers intelligents exploite la vitesse de poinçonnage élevée du moule ( $> 100$  fois/seconde  $\pm 10$  fois/seconde) et les économies de matière (déchets  $< 2\% \pm 0,5\%$ ) pour améliorer l'efficacité de fabrication d'appareils électroménagers tels que les enceintes connectées et les machines à laver.

Les cartes de circuits imprimés avioniques (modules de commandes de vol et systèmes de navigation, par exemple) et l'électronique de défense (guidage de missiles et équipements de communication) reposent sur la résistance aux chocs ( $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) et la durabilité ( $> 1,5 \times 10^7$  fois  $\pm 10^5$  fois) des moules pour une utilisation à long terme dans des environnements extrêmes. Le développement des objets connectés et de la technologie 6G favorise l'utilisation des moules, notamment pour le conditionnement de modules informatiques de pointe et de circuits imprimés ultra-haute fréquence. Grâce à l'optimisation par IA et au nanorevêtement (WC/C), ces moules garantissent des performances élevées et de faibles coûts de maintenance (réduction des temps d'arrêt  $> 15\% \pm 2\%$ ), contribuant ainsi au développement intelligent et efficace de l'industrie électronique du futur.

#### (4) Matrice d'emboutissage de micro-connecteurs en carbure

##### Qu'est-ce qu'une matrice d'emboutissage de micro-connecteurs en carbure ?

La matrice d'emboutissage pour micro-connecteurs en carbure est un outil de haute précision conçu pour l'usinage de micro-connecteurs. Elle est principalement utilisée pour les micro-connecteurs tels que USB-C, HDMI, Lightning et les nouvelles interfaces haut débit (comme Thunderbolt 5 et les interfaces hybrides optoélectroniques). Son matériau de base est du WC-10Co, avec une granulométrie de  $0,4 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ . Le moulage par injection de poudre ultrafine garantit l'uniformité du matériau, une précision d'emboutissage inférieure à  $0,003 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$  et une durabilité de  $1,5 \times 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois. Le revêtement DLC (carbone de type diamant) (épaisseur  $2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , dureté HV  $3000 \pm 100$ ) est appliqué sur la surface du moule par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD), ce qui réduit considérablement le taux d'usure ( $< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,005 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), améliore la résistance à la corrosion (test au brouillard salin  $> 500 \text{ heures} \pm 50 \text{ heures}$ ) et la lubrification (coefficient de frottement  $< 0,1 \pm 0,01$ ). Associé à un nanorevêtement (tel que WC/C ou aC:H, épaisseur  $5-15 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ ) et à la technologie micro-EDM, le moule prend en charge des structures ultrafines (pas  $< 0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), un courant porteur

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

élevé ( $> 5 \text{ A} \pm 0,5 \text{ A}$ ) et une stabilité de transmission du signal optique (perte  $< 0,1 \text{ dB/km} \pm 0,01 \text{ dB/km}$ ), et prolonge la durée de vie et réduit les coûts de maintenance ( $< 5 \% \pm 1 \%$ ) grâce à des fonctions autolubrifiantes (telles que les additifs  $\text{MoS}_2$ ), répondant aux besoins de traitement de connecteurs hautes performances.

### Performances de la matrice d'emboutissage des micro-connecteurs en carbure

Français Le moule a une dureté élevée ( $\text{HV } 2000 \pm 50$ ), une excellente résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,005 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), une durabilité élevée ( $> 1,5 \times 10^6 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ ) et une précision d'emboutissage ultra-élevée ( $< 0,003 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$ ). Le revêtement DLC améliore la résistance à la corrosion (résistance au brouillard salin  $> 500 \text{ heures} \pm 50 \text{ heures}$ ) et la lubrification (coefficient de frottement  $< 0,1 \pm 0,01$ ), et le nano-revêtement (tel que WC/C) améliore encore la durabilité ( $> 2 \times 10^6 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ ) et la résistance aux hautes températures ( $> 600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ). La fonction autolubrifiante optimise les coûts de maintenance ( $< 5 \% \pm 1 \%$ ), et le micro-EDM prend en charge les structures ultrafines (pas  $< 0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), répondant aux besoins de courant élevé ( $> 5 \text{ A} \pm 0,5 \text{ A}$ ) et de transmission de signaux optiques (perte  $< 0,1 \text{ dB/km} \pm 0,01 \text{ dB/km}$ ).

### Types de matrices d'emboutissage de micro-connecteurs en carbure

#### Moule standard

Basé sur un revêtement WC-10Co et DLC, adapté à l'estampage USB-C et HDMI, précision  $< 0,003 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$ , durabilité  $1,5 \times 10^6 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ .

#### Moule à grande vitesse

Revêtement nano WC/C ajouté ( $5-15 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ ), prend en charge le courant élevé Thunderbolt 5 ( $> 5 \text{ A} \pm 0,5 \text{ A}$ ) et une durabilité  $> 2 \times 10^6 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ .

#### Moule photoélectrique

Optimiser le micro-EDM pour répondre à la stabilité du signal optique de l'interface hybride optoélectronique (perte  $< 0,1 \text{ dB/km} \pm 0,01 \text{ dB/km}$ ) et à la précision  $< 0,002 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$ .

#### Moule autolubrifiant

Intégré avec des additifs et des capteurs  $\text{MoS}_2$ , il réduit les coûts de maintenance ( $< 5 \% \pm 1 \%$ ) et convient à une utilisation haute fréquence ( $> 10 \text{ GHz} \pm 1 \text{ GHz}$ ).

### Application des matrices d'emboutissage de micro-connecteurs en carbure

Les matrices d'emboutissage pour micro-connecteurs en carbure sont largement utilisées dans l'électronique grand public et les centres de données. Pour les smartphones, les tablettes et les ordinateurs portables, elles permettent la production en série d'interfaces USB-C, HDMI et Lightning, garantissant des structures ultra-fines (pas  $< 0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) et un emboutissage de haute précision ( $< 0,003 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$ ), améliorant ainsi la fiabilité et la compacité des ports. Dans les centres de données et les serveurs, les matrices sont utilisées pour la fabrication d'interfaces Thunderbolt 5 et de données haut débit afin de répondre aux besoins de courants porteurs élevés ( $> 5 \text{ A} \pm 0,5 \text{ A}$ ) et de débits de données élevés ( $> 40 \text{ Gbit/s} \pm 2 \text{ Gbit/s}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le développement de nouvelles interfaces hybrides optoélectroniques repose sur la stabilité de la transmission du signal optique (perte  $< 0,1 \text{ dB/km} \pm 0,01 \text{ dB/km}$ ) et la durabilité ( $> 1,5 \times 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois) du moule, largement utilisé dans les équipements de communication par fibre optique et les clusters de calcul haute performance. Dans l'électronique automobile, le moule prend en charge le traitement des connecteurs pour les systèmes d'infodivertissement embarqués et les systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS), s'adaptant aux environnements à haute température ( $> 600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) et aux exigences de fiabilité élevées (rendement  $> 98 \% \pm 1 \%$ ). Les appareils domestiques intelligents tels que les enceintes et les routeurs intelligents utilisent également le poinçonnage à grande vitesse ( $> 100$  fois/seconde  $\pm 10$  fois/seconde) et la résistance à la corrosion (résistance au brouillard salin  $> 500$  heures  $\pm 50$  heures) du moule pour améliorer la durabilité du produit.

Les dispositifs d'automatisation industrielle et IoT (tels que les modules de contrôle industriel et les nœuds de capteurs) s'appuient sur la lubrification (coefficient de frottement  $< 0,1 \pm 0,01$ ) et la fonction autolubrifiante du moule pour réduire les coûts de maintenance ( $< 5 \% \pm 1 \%$ ) et optimiser l'efficacité de la production (augmentation  $> 20 \% \pm 2 \%$ ). L'électronique aérospatiale (comme les modules de communication par satellite) et l'électronique de défense (comme les équipements de communication cryptés) utilisent la résistance aux chocs ( $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) et la durabilité du moule pour répondre aux exigences d'une utilisation à long terme dans des environnements extrêmes. Grâce au nano-revêtement et à l'optimisation de l'IA, le moule soutient le développement des futures interfaces haut débit (comme les communications 6G) et des connecteurs miniaturisés, favorisant ainsi l'efficacité et l'intelligence de l'industrie électronique.

## **(5) Moule d'emballage de capteur en carbure**

### **Qu'est-ce qu'un moule d'emballage de capteur en carbure ?**

Les moules d'encapsulation de capteurs en carbure cémenté sont des outils de haute précision conçus spécifiquement pour le domaine de l'encapsulation de capteurs, principalement utilisés pour les MEMS (systèmes microélectromécaniques), les capteurs environnementaux (tels que les capteurs de pression, de température, de gaz) et les capteurs médicaux (tels que les capteurs d'oxygène sanguin, les capteurs ECG). Son matériau de base utilise la formule WC-Co-Ni (Ni  $2 \% \pm 0,5 \%$ ), une granulométrie de  $0,7 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$  et un pressage isostatique à chaud (HIP,  $1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $150 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) pour améliorer la densité (porosité  $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$ ), prendre en charge des structures 3D complexes (hauteur  $0,05\text{-}0,1 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ , rugosité des parois latérales  $R_a < 0,2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,05 \text{ } \mu\text{m}$ ) et une durée de vie d'environ  $7 \times 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois. Un revêtement ALD (dépôt de couche atomique) (tel que  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , épaisseur  $10\text{-}20 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ ) est appliqué sur la surface du moule pour améliorer la résistance à l'humidité (résistance à l'humidité  $> 95 \% \text{ HR} \pm 2 \% \text{ HR}$ ) et les performances antibactériennes (taux antibactérien  $> 99 \% \pm 0,5 \%$ ), et des micro-canaux de refroidissement (diamètre  $0,01\text{-}0,02 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) sont utilisés pour optimiser le processus d'emballage à haute température ( $> 200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Des capteurs intégrés surveillent les contraintes de l'emballage ( $< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) pour répondre aux exigences de miniaturisation (taille  $< 1 \text{ mm}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$^3 \pm 0,1 \text{ mm}^3$ ), de haute précision (écart  $< 0,001 \text{ mm} \pm 0,0002 \text{ mm}$ ) et de biocompatibilité (conformément à la norme ISO 10993).

### Performances du moule d'emballage de capteur en carbure

Le moule présente une dureté élevée (HV 1800±30), une excellente résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), une durabilité élevée ( $> 7 \times 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois) et un emballage de haute précision (écart  $< 0,001 \text{ mm} \pm 0,0002 \text{ mm}$ ). Le revêtement  $\text{Al}_2\text{O}_3$  améliore la résistance à l'humidité ( $> 95 \% \text{ HR} \pm 2 \% \text{ HR}$ ) et les performances antibactériennes (taux antibactérien  $> 99 \% \pm 0,5 \%$ ), les micro-canaux de refroidissement optimisent la gestion thermique (contrôle de la température  $< 200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), les capteurs intégrés surveillent les contraintes ( $< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) et prennent en charge les structures 3D complexes (hauteur  $0,05\text{-}0,1 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ , rugosité des parois latérales  $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ ), répondant aux exigences de biocompatibilité et d'emballage à haute température.

### Types de moules d'emballage de capteurs en carbure

#### Moule standard

À base de revêtement WC-Co-Ni et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , adapté aux MEMS et aux capteurs environnementaux, avec une précision  $< 0,001 \text{ mm} \pm 0,0002 \text{ mm}$  et une durabilité  $7 \times 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois.

#### Moule à haute température

L'ajout de TiC ( $5\%\text{-}10\% \pm 0,5\%$ ) prend en charge le conditionnement à haute température ( $> 200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), ce qui convient aux capteurs IoT industriels.

#### moisissure médicale

Biocompatibilité optimisée (ISO 10993), micro-canaux de refroidissement (diamètre  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) pour capteurs d'oxygène sanguin et ECG.

#### Moule intelligent

Capteur de contrainte intégré pour la surveillance en temps réel (précision  $\pm 1\%$ ), adapté à l'emballage d'appareils portables de haute précision.

### Application du moule d'emballage de capteur en carbure

Les moules d'encapsulation de capteurs en carbure sont largement utilisés dans les maisons intelligentes, l'Internet des objets industriel et l'électronique médicale. Dans ce domaine, ils permettent l'encapsulation de thermostats intelligents, de capteurs de qualité de l'air et de contrôleurs d'éclairage intelligents, garantissant miniaturisation (taille  $< 1 \text{ mm}^3 \pm 0,1 \text{ mm}^3$ ) et haute précision (écart  $< 0,001 \text{ mm} \pm 0,0002 \text{ mm}$ ), améliorant ainsi la réactivité des équipements et les économies d'énergie. Dans l'Internet des objets industriel, les moules sont utilisés pour l'encapsulation de capteurs de pression, de température et de vibrations dans les usines intelligentes, s'adaptant aux environnements à haute température ( $> 200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) et aux structures 3D complexes (hauteur  $0,05\text{-}0,1 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ ), favorisant ainsi l'automatisation et la maintenance prédictive de l'Industrie 4.0 (réduction des temps d'arrêt de  $> 15 \% \pm 2 \%$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'électronique médicale est un domaine d'application important. Le moule permet le conditionnement de capteurs d'oxygène sanguin, d'ECG (électrocardiogramme) et de pompes à insuline. Grâce à sa biocompatibilité (conforme à la norme ISO 10993) et à ses propriétés antibactériennes (taux antibactérien  $> 99 \% \pm 0,5 \%$ ), il répond aux exigences de fiabilité élevées des moniteurs cardiaques portables et des dispositifs médicaux implantables (rendement  $> 98 \% \pm 1 \%$ ). Dans l'électronique grand public, les moules sont utilisés pour le conditionnement des capteurs environnementaux des montres connectées et des trackers d'activité afin d'améliorer la résistance à l'humidité ( $> 95 \% \text{ HR} \pm 2 \%$ ) et la durabilité ( $> 7 \times 10^5 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ ).

Dans le domaine de l'électronique automobile, les moules permettent le conditionnement de capteurs embarqués (tels que les capteurs de surveillance de la pression des pneus et de détection de collision) afin de s'adapter à des plages de températures extrêmes ( $-40^\circ\text{C}$  à  $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) et à des exigences de haute précision (écart  $< 0,001 \text{ mm} \pm 0,0002 \text{ mm}$ ). L'électronique aérospatiale (comme les enregistreurs de données de vol) et l'électronique de défense (comme les capteurs de détection d'agents de guerre chimique) utilisent la résistance à la corrosion et la durabilité des moules pour répondre à une utilisation à long terme dans des environnements extrêmes. Dans les dispositifs IoT et d'informatique de pointe, les moules optimisent les performances des capteurs grâce à des micro-canaux de refroidissement et à la surveillance des contraintes ( $< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ), favorisant ainsi le développement efficace et intelligent des futurs réseaux de capteurs.

## (6) Moule de perçage laser au carbure

### outil de perçage laser au carbure ?

La matrice de perçage laser en carbure cémenté est un outil de haute précision conçu pour l'usinage de micro-trous (trous borgnes, trous enterrés) sur les cartes HDI et les circuits imprimés haut de gamme (cartes mères de serveurs, circuits imprimés radar, cartes de communication par satellite). Son matériau de base est en WC-TiC-6Co avec une granulométrie de  $0,9 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ . Sa durabilité est améliorée par frittage à haute température ( $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) et durcissement de surface au laser (dureté portée à  $\text{HV } 2000 \pm 50$ ). La précision de perçage est inférieure à  $0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$  et l'écart d'ouverture est inférieur à  $0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ . Français La matrice adopte un revêtement TiCN (épaisseur  $10\text{-}15 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , utilisant la technologie CVD) pour améliorer la résistance aux chocs thermiques laser ( $> 10^4 \text{ fois} \pm 10^3 \text{ fois}$ ) et prend en charge le perçage laser à haute densité d'énergie ( $> 10^6 \text{ W/cm}^2 \pm 10^5 \text{ W/cm}^2$ ). Combiné à une conception de structure poreuse (densité de pores  $> 1000/\text{cm}^2 \pm 100/\text{cm}^2$ ) et à une résistance au laser UV (longueur d'onde  $193 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ , résistance  $> 10^5 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ ), le moule optimise les performances grâce à une technologie de traitement ultra-précise (comme le laser femtoseconde) et un revêtement auto-cicatrisant (comme TiAlCN, épaisseur  $15\text{-}25 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$ ). La structure à gradient multicouche améliore la conductivité thermique ( $> 200 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) et réduit les fissures thermiques (longueur  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), répondant aux besoins du traitement des micro-trous des circuits imprimés haut de gamme.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Performances des matrices de perçage laser en carbure

Français Le moule a une dureté élevée (HV 2000±50), une excellente résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), une durabilité élevée ( $> 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois) et un perçage de haute précision ( $< 0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , écart de diamètre de trou  $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ). Le revêtement TiCN améliore la résistance aux chocs thermiques laser ( $> 10^4$  fois  $\pm 10^3$  fois), et les revêtements auto-cicatrisants (tels que TiAlCN) optimisent la durabilité ( $> 2 \times 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois) et la stabilité thermique ( $> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ). La structure à gradient multicouche améliore la conductivité thermique ( $> 200 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ), réduit les fissures thermiques ( $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), prend en charge une densité énergétique élevée ( $> 10^6 \text{ W/cm}^2 \pm 10^5 \text{ W/cm}^2$ ) et une tolérance au laser UV (longueur d'onde  $193 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ,  $> 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois).

## Types de matrices de perçage laser en carbure

### Moule standard

Basé sur un revêtement WC-TiC-6Co et TiCN, il convient aux trous borgnes dans les cartes HDI avec une précision de  $< 0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$  et une durabilité de  $1 \times 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois.

### Moule à haute température

Ajoutez un revêtement auto-réparateur TiAlCN ( $15\text{-}25 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$ ), résistance à la chaleur  $> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ , adapté au perçage de PCB radar.

### Moule à trous multiples

Structure poreuse optimisée (densité de pores  $> 1000/\text{cm}^2 \pm 100 /\text{cm}^2$ ), prend en charge les micropores haute densité dans les cartes de communication par satellite et est résistante aux UV  $> 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois.

### Moule ultra-précis

Le traitement au laser femtoseconde est utilisé pour répondre aux exigences des micropores des équipements AR/VR (ouverture  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) et de conductivité thermique  $> 200 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ .

## Application du moule de perçage laser en carbure cimenté

Les matrices de perçage laser en carbure sont largement utilisées dans l'usinage de circuits imprimés haut de gamme. Pour l'usinage de micro-trous sur cartes HDI, elles permettent le perçage précis de trous borgnes et enterrés (précision  $< 0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), répondant ainsi aux exigences de câblage haute densité des cartes mères de smartphones, tablettes et ordinateurs portables. Pour la production de cartes mères de serveurs et de circuits imprimés pour centres de données, la haute tolérance à la densité énergétique ( $> 10^6 \text{ W/cm}^2 \pm 10^5 \text{ W/cm}^2$ ) et la conductivité thermique ( $> 200 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) des matrices garantissent une connexion fiable des processeurs hautes performances.

La fabrication de circuits imprimés radar et de cartes de communication par satellite repose sur la résistance du moule aux chocs thermiques laser ( $> 10^4$  fois  $\pm 10^3$  fois) et sur sa structure poreuse

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(densité de pores  $> 1\,000/\text{cm}^2 \pm 100/\text{cm}^2$ ), permettant ainsi l'usinage de micro-trous d'antennes 5G, de radars à ondes millimétriques et de modules de communication aérospatiaux. Dans le domaine de l'électronique grand public haut de gamme, comme les dispositifs de réalité augmentée/réalité virtuelle et les lunettes intelligentes, les moules utilisent la technologie laser femtoseconde pour réaliser des ultra-micro-trous (ouverture  $< 0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ ), améliorant ainsi l'intégration des composants optiques et électroniques. Dans le domaine de l'électronique automobile, les moules sont utilisés pour l'usinage de micro-trous de systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS) et de cartes de circuits imprimés radar embarquées, s'adaptant aux environnements à haute température ( $> 800\text{ }^\circ\text{C} \pm 50\text{ }^\circ\text{C}$ ) et aux exigences de fiabilité élevées (rendement  $> 98\% \pm 1\%$ ).

Français L'électronique aérospatiale (comme les modules de contrôle de vol et les systèmes de navigation) et l'électronique de défense (comme les systèmes de guidage de missiles et de contre-mesures électroniques) utilisent la résistance au laser UV du moule (longueur d'onde  $193\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$ ,  $> 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois) et la durabilité ( $> 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois) pour répondre aux exigences d'utilisation à long terme dans des environnements extrêmes. L'automatisation industrielle et les appareils IoT (tels que les cartes de contrôle d'usine intelligentes) s'appuient sur le contrôle des fissures thermiques du moule ( $< 0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ ) et le revêtement auto-cicatrisant pour optimiser l'efficacité de la production (augmentation  $> 20\% \pm 2\%$ ) et réduire les coûts de maintenance ( $< 5\% \pm 1\%$ ). Avec le développement de la technologie 6G et des ondes millimétriques, le moule prend en charge le traitement efficace des futures cartes de circuits imprimés haute fréquence grâce à des structures à gradient multicouche et à l'optimisation de l'IA.

## Le développement et les perspectives des moules en carbure cimenté dans l'industrie électronique

Avec la demande croissante de miniaturisation des dispositifs microélectroniques (processus de 5 nm et moins), de l'électronique flexible (circuits extensibles, OLED et e-textiles), des communications 5G/6G, de l'électronique des véhicules à énergie nouvelle (tels que les systèmes de gestion de batterie et les cartes de contrôle des piles de charge), des appareils IoT et des équipements médicaux intelligents, le champ d'application et les exigences d'optimisation des performances des moules de l'industrie électronique en carbure cimenté ont considérablement augmenté.

Le développement rapide de l'industrie électronique a favorisé l'itération de la technologie des moules en carbure cimenté. De nouveaux revêtements avancés (tels que ZrN, AlCrN, WC/C, épaisseur  $15\text{-}25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$ ) et des technologies de fabrication additive (telles que SLM, EBM) ont été ajoutés pour améliorer la durée de vie du moule ( $> 2 \times 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois), la précision ( $< 0,002\text{ mm} \pm 0,0005\text{ mm}$ ) et la polyvalence (telle que conductivité thermique  $> 150\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ , isolation  $> 10^{12}\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{11}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ ). En tant que produit grand public haut de gamme, les moules en carbure cimenté ont obtenu des performances exceptionnelles dans les domaines des puces d'IA, de l'informatique quantique, de l'électronique des véhicules électriques, des écrans flexibles et des dispositifs médicaux intelligents. À l'avenir, les moules évolueront vers l'intelligence, intégrant des capteurs de surveillance de l'usure (précision en temps réel  $< 0,001\text{ mm} \pm 0,0001\text{ mm}$ ),

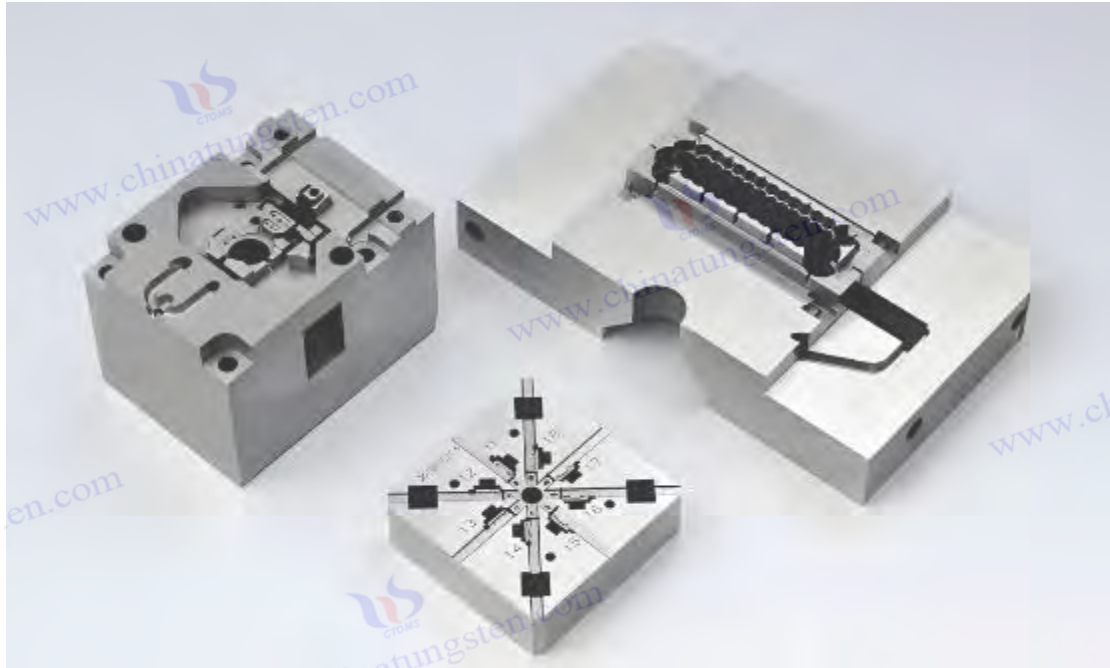
### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des fonctions d'ajustement adaptatif (compensation des contraintes  $< 5 \text{ MPa} \pm 0,5 \text{ MPa}$ ) et une conception respectueuse de l'environnement (réduction de l'utilisation de métaux lourds  $< 1 \% \pm 0,1 \%$ ) afin de répondre au double défi de fiabilité élevée, de faible coût et de développement durable de l'industrie électronique. Parallèlement, les ajustements de la chaîne d'approvisionnement mondiale et la production régionale (comme en Chine de l'Est et en Asie du Sud-Est) favoriseront l'optimisation de l'agencement de l'industrie des moules.

Dans l'industrie électronique, les substrats dissipateurs thermiques en carbure cimenté sont devenus des composants essentiels des solutions de dissipation thermique des dispositifs électroniques de forte puissance grâce à leur excellente conductivité thermique, leur résistance aux températures élevées, leur faible coefficient de dilatation thermique et leurs excellentes performances d'isolation électrique. Avec l'évolution rapide de l'industrie électronique vers des performances élevées, une compacité et une intelligence accrues, la demande de substrats dissipateurs thermiques en carbure cimenté a considérablement augmenté. Ces substrats doivent avoir une conductivité thermique élevée ( $> 200 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), un faible coefficient de dilatation thermique (environ  $4-6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) et une excellente isolation (résistivité volumique  $> 10^{12} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ), pour relever efficacement les défis de dissipation thermique des LED, des stations de base 5G/6G, des modules d'alimentation des véhicules électriques, des puces d'intelligence artificielle et des domaines émergents tels que les dispositifs informatiques quantiques. Le matériau est préparé en mélangeant du WC (carbure de tungstène) avec des particules de Cu (cuivre), de diamant, d'AlN (nitrure d'aluminium), de SiC (carbure de silicium) ou de BN (nitrure de bore) (taille des particules  $10-50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ), et en utilisant des procédés avancés tels que le frittage par pressage à froid ( $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ), la diffusion par pressage à chaud ( $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$ ) ou le pressage isostatique (HIP,  $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $150 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) pour assurer une distribution uniforme, une densité (porosité  $< 1\% \pm 0,1\%$ ) et une stabilité microstructurale (taille des grains  $< 1 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ ). Ces substrats sont encore améliorés en termes d'efficacité de dissipation thermique et de fiabilité grâce à un traitement de précision (tel que le polissage mécano-chimique CMP, la rugosité de surface  $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ ) et à une modification de surface (telle que le revêtement CVD, la pulvérisation plasma).

Avec l'intégration haute densité des dispositifs électroniques ( $> 10^6$  transistors/ $\text{mm}^2 \pm 10^5$  transistors/ $\text{mm}^2$ ), la densité de puissance accrue ( $> 100 \text{ W/cm}^2 \pm 10 \text{ W/cm}^2$ ) et la température de fonctionnement plus élevée ( $> 150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), la taille du marché des substrats de dissipation thermique en carbure cimenté devrait atteindre 3 milliards de dollars US  $\pm 300$  millions de dollars US, avec un taux de croissance annuel de 20 à 25 %, devenant un domaine d'application haut de gamme dans l'industrie du carbure cimenté, en particulier dans la prochaine génération de communications, de véhicules à énergie nouvelle, d'automatisation industrielle et d'électronique de défense.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



#### 14.1.2 Substrat de dissipation thermique en alliage dur pour l'industrie électronique

##### (1) Substrat composite de dissipation thermique en carbure de tungstène et cuivre (WC-Cu)

##### Qu'est-ce qu'un dissipateur thermique composite en carbure de tungstène et cuivre (WC-Cu) ?

Le substrat composite de dissipation thermique en carbure de tungstène et cuivre (WC-Cu) est un matériau hautes performances conçu pour une gestion thermique efficace. Il est principalement utilisé dans les modules d'éclairage LED, les modules électroniques de puissance (tels que les IGBT et les pilotes MOSFET), les unités de gestion de l'alimentation pour l'électronique grand public, les onduleurs de véhicules électriques et les alimentations de serveurs de centres de données. Composé de WC et de Cu (rapport volumique  $70:30 \pm 1\%$ ), il est préparé par frittage par pressage à froid ( $1\,200\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ ,  $40\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$ ) suivi d'un traitement thermique ( $1\,000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ , recuit de 2 heures  $\pm 0,1$  heure, protection à l'azote) afin de garantir l'uniformité du matériau et la densité microstructurale (porosité  $< 0,8\% \pm 0,1\%$ ). Le substrat a une conductivité thermique de  $220\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ , un coefficient de dilatation thermique de  $5 \times 10^{-6}/\text{°C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/\text{°C}$ , une épaisseur de  $0,5\text{--}1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ , est léger (densité  $12\text{--}13\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$ ) et présente une résistance mécanique élevée (résistance à la compression  $> 2500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ ). La surface est galvanisée avec une couche Ni/Au (épaisseur  $0,1\text{--}0,3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ ) pour améliorer la soudabilité et la résistance à l'oxydation (résistance aux hautes températures  $> 300\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ , résistance à l'humidité  $> 95\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$ ), et une couche Ni-P plaquée chimiquement (épaisseur  $1\text{--}3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ ) pour améliorer la résistance à la corrosion (test au brouillard salin  $> 500\text{ heures} \pm 50\text{ heures}$ ).

Combinant une structure multicouche (épaisseur  $0,3\text{--}0,7\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ ) et un système de refroidissement à microcanaux (diamètre  $0,02\text{--}0,05\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ , débit  $> 0,1\text{ L/min} \pm 0,01\text{ L/min}$ ),

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

le substrat utilise des particules de nano-Cu (taille des particules  $< 10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ ) pour améliorer la force de liaison de l'interface (force d'adhérence  $> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) et la technologie de micro-usinage laser pour obtenir une microtexture de surface (rugosité  $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), optimisent l'efficacité de la dissipation thermique ( $> 250 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ), la contrainte thermique ( $< 15 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) et l'uniformité thermique (gradient de température  $< 3^\circ\text{C} \pm 0,3^\circ\text{C}$ ), et répondent aux exigences de dissipation thermique hautes performances.

### **Performances du substrat de dissipation thermique composite en carbure de tungstène et cuivre (WC-Cu)**

Le substrat présente une conductivité thermique élevée ( $220 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , optimisée à  $> 250 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ), un faible coefficient de dilatation thermique ( $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), une résistance mécanique élevée (résistance à la compression  $> 2500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) et une conception légère (densité  $12-13 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ). Français La phase Cu améliore la conductivité électrique ( $> 10^6 \text{ S/m} \pm 10^5 \text{ S/m}$ ), réduit l'échauffement résistif ( $< 0,5^\circ\text{C/W} \pm 0,05^\circ\text{C/W}$ ) et optimise les performances de cyclage thermique ( $-40^\circ\text{C}$  à  $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , nombre de cycles  $> 5\,000$  fois  $\pm 500$  fois). La couche de placage Ni/Au améliore la soudabilité (résistance à haute température  $> 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , résistance à l'humidité  $> 95\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$ ), et la couche Ni-P améliore la résistance à la corrosion (résistance au brouillard salin  $> 500$  heures  $\pm 50$  heures). Le système de refroidissement à microcanaux et les particules de nano-Cu améliorent encore l'efficacité de la dissipation thermique et le collage des interfaces (force d'adhérence  $> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ), et la simulation thermique pilotée par l'IA réduit les contraintes thermiques ( $< 15 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) et le gradient de température ( $< 3^\circ\text{C} \pm 0,3^\circ\text{C}$ ).

### **Types de substrats de dissipateurs thermiques composites en carbure de tungstène et cuivre (WC-Cu)**

#### **Substrat standard**

À base de WC-Cu 70:30 et revêtement Ni/Au, adapté aux modules d'éclairage LED, épaisseur  $0,5-1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ , conductivité thermique  $220 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ .

#### **Substrat haute température**

Ajout d'une couche Ni-P ( $1-3 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ), résistance à la chaleur  $> 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , convient aux pilotes IGBT et MOSFET.

#### **Substrat miniaturisé**

Structures multicouches optimisées (épaisseur  $0,3-0,7 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) et microcanaux (diamètre  $0,02-0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) pour dispositifs micro-LED et AR/VR.

#### **Substrat intelligent**

Intègre la simulation thermique de l'IA et les particules nano-Cu (taille des particules  $< 10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ ), avec une efficacité de dissipation thermique  $> 250 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , adaptée aux alimentations des centres de données.

### **Application d'un substrat composite de dissipation thermique en carbure de tungstène et**

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## cuivre (WC-Cu)

Les substrats composites de dissipation thermique en carbure de tungstène et cuivre (WC-Cu) sont largement utilisés dans l'éclairage, l'électronique et les véhicules électriques. Dans les modules d'éclairage LED, le substrat prend en charge les matrices de LED haute luminosité (densité de puissance  $> 50 \text{ W/cm}^2 \pm 5 \text{ W/cm}^2$ , luminosité  $> 200 \text{ lm/W} \pm 10 \text{ lm/W}$ ), utilisées pour les lampadaires intelligents, les LED embarquées et l'éclairage intérieur, améliorant ainsi l'efficacité lumineuse et les performances de dissipation thermique (conductivité thermique  $220 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ). Dans les modules d'électronique de puissance, le substrat est utilisé pour les pilotes IGBT et MOSFET, optimisant les performances du cycle thermique ( $> 5\,000$  fois  $\pm 500$  fois) et la conductivité électrique ( $> 10^6 \text{ S/m} \pm 10^5 \text{ S/m}$ ), répondant ainsi aux besoins des variateurs de vitesse industriels et des onduleurs d'énergie renouvelable.

Les unités de gestion de l'énergie des appareils électroniques grand public, telles que les adaptateurs secteur pour ordinateurs portables et les chargeurs haute puissance, s'appuient sur la légèreté (densité  $12\text{-}13 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) et la résistance à la corrosion (résistance au brouillard salin  $> 500$  heures  $\pm 50$  heures) du substrat pour améliorer la fiabilité et la durée de vie de l'équipement. Dans les onduleurs de véhicules électriques, la résistance mécanique élevée du substrat ( $> 2\,500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) et le refroidissement par microcanaux (débit  $> 0,1 \text{ L/min} \pm 0,01 \text{ L/min}$ ) permettent une dissipation thermique efficace ( $> 250 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) et une uniformité thermique ( $< 3 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) pour répondre aux besoins élevés en puissance des véhicules à énergies nouvelles. Les alimentations des serveurs de centres de données utilisent la conception optimisée par l'IA du substrat et des particules nano-Cu (force d'adhérence  $> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) pour réduire les contraintes thermiques ( $< 15 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) et améliorer l'efficacité de la dissipation thermique, prenant en charge le fonctionnement stable des accélérateurs de calcul haute performance et d'IA.

Dans le domaine des micro-LED, le substrat prend en charge les écrans avec une densité de pixels  $> 1\,000 \text{ PPI} \pm 100 \text{ PPI}$  et les LED automobiles (durabilité  $> 10^5$  heures  $\pm 10^4$  heures), qui sont utilisés dans les dispositifs AR/VR et les systèmes d'éclairage automobile. L'électronique médicale, comme les dispositifs médicaux de haute puissance et l'électronique aérospatiale (comme les modules d'alimentation pour satellites), s'appuie sur la résistance élevée du substrat aux températures ( $> 300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) et à l'humidité ( $> 95 \text{ \% HR} \pm 2 \text{ \% HR}$ ) pour répondre aux exigences de dissipation thermique dans les environnements extrêmes. Les modules d'automatisation industrielle et d'informatique de pointe utilisent la microtexture de surface du substrat (rugosité  $R_a < 0,05 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$ ) et sa structure multicouche pour optimiser l'efficacité de la production (augmentation  $> 20 \text{ \%} \pm 2 \text{ \%}$ ) et réduire les coûts de maintenance ( $< 5 \text{ \%} \pm 1 \text{ \%}$ ), favorisant ainsi l'application généralisée de la technologie de dissipation thermique haute performance à l'avenir.

## (2) Substrat de dissipation thermique composite en carbure de tungstène-diamant (WC-Diamond)

### substrat de dissipation thermique composite carbure de tungstène-diamant (WC-Diamond) ?

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le substrat composite de dissipation thermique carbure de tungstène-diamant (WC-Diamant) est un matériau haut de gamme conçu pour une gestion thermique haute performance. Il est principalement utilisé dans les modules RF de stations de base 5G/6G, l'électronique de puissance des véhicules électriques (onduleurs, contrôleurs de piles de charge), les serveurs de calcul haute performance et les systèmes radar militaires. Il est composé de WC et de diamant (granulométrie  $20 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ , rapport volumique  $60:40 \pm 1 \%$ ) et est préparé par pressage-diffusion à chaud ( $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$ ) et pressage isostatique (HIP,  $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $150 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) pour garantir une densité du matériau (porosité  $< 0,6 \% \pm 0,1 \%$ ) et une uniformité du grain ( $< 0,8 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ ). La conductivité thermique du substrat est de  $320 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , et l'isolation est  $> 10^{13} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{12} \Omega\cdot\text{cm}$ , épaisseur  $0,3\text{-}0,8 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ , résistance à la température  $> 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  (stabilité thermique  $> 500 \text{ heures} \pm 50 \text{ heures}$ ), résistance mécanique élevée (résistance à la flexion  $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ).

La surface est revêtue d'un revêtement diamant CVD (épaisseur  $1\text{-}3 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) pour améliorer la résistance à l'usure (dureté HV  $8000 \pm 500$ ) et l'uniformité de la dissipation thermique (gradient de température  $< 5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ ), et la technologie de nettoyage plasma est utilisée pour optimiser l'adhérence de l'interface ( $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ). Combiné à la structure composite à gradient (teneur en WC  $30\%\text{-}60\% \pm 1\%$ ) et à la couche de dissipation thermique nano (épaisseur  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), le substrat est optimisé par la technologie de micro-usinage laser. La microstructure de surface (porosité  $1\%\text{-}2\% \pm 0,1\%$ ) augmente la zone de dissipation thermique ( $> 300 \text{ cm}^2 \pm 20 \text{ cm}^2$ ) et réduit la résistance thermique ( $< 0,2^\circ\text{C/W} \pm 0,02^\circ\text{C/W}$ ). Le module de gestion thermique adaptative (temps de réponse  $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ ) surveille la température en intégrant des thermocouples (précision  $< 0,2^\circ\text{C} \pm 0,02^\circ\text{C}$ ) pour répondre aux besoins de dissipation thermique à haute fréquence et à courant ultra-important.

### Performances du substrat de dissipation thermique composite carbure de tungstène-diamant (WC-Diamond)

Français Le substrat a une conductivité thermique ultra-élevée ( $320 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , après optimisation  $> 350 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), une excellente isolation ( $> 10^{13} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{12} \Omega\cdot\text{cm}$ ), une résistance mécanique élevée (résistance à la flexion  $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) et une résistance à haute température ( $> 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , stabilité thermique  $> 500 \text{ heures} \pm 50 \text{ heures}$ ). Le revêtement diamant améliore la résistance à l'usure (dureté HV  $8000 \pm 500$ ) et l'uniformité de la dissipation thermique (gradient de température  $< 5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ ), la couche de dissipation thermique nano réduit la résistance thermique ( $< 0,2^\circ\text{C/W} \pm 0,02^\circ\text{C/W}$ ), et la structure du gradient optimise la conduction thermique ( $> 350 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ). Le module de gestion thermique adaptative surveille la température via des thermocouples (précision  $< 0,2^\circ\text{C} \pm 0,02^\circ\text{C}$ , temps de réponse  $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ ), prenant en charge les dispositifs d'alimentation haute fréquence ( $> 10 \text{ GHz} \pm 1 \text{ GHz}$ ) et les applications à haute densité de puissance ( $> 200 \text{ W/cm}^2 \pm 20 \text{ W/cm}^2$ ).

### Types de substrats de dissipation thermique composites en carbure de tungstène-diamant

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## (WC-Diamond)

### Substrat standard

Basé sur le revêtement WC-Diamond 60:40 et CVD, il convient aux modules RF de station de base 5G d'une épaisseur de  $0,3-0,8 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$  et d'une conductivité thermique de  $320 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ .

### Substrat haute température

Structure à gradient ajoutée (WC 30%-60% $\pm 1\%$ ), résistance à la chaleur  $> 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , adaptée aux onduleurs de véhicules électriques.

### Substrat haute fréquence

Dissipateur thermique nano intégré (épaisseur  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), prend en charge les appareils  $> 10 \text{ GHz} \pm 1 \text{ GHz}$  et résistance thermique  $< 0,2^\circ\text{C/W} \pm 0,02^\circ\text{C/W}$ .

### Substrat intelligent

Module de gestion thermique adaptatif intégré et thermocouple, zone de dissipation thermique  $> 300 \text{ cm}^2 \pm 20 \text{ cm}^2$ , adapté aux systèmes radar militaires.

## Application d'un substrat composite de dissipation thermique en carbure de tungstène-diamant (WC-Diamond)

Les substrats de dissipation thermique composites en carbure de tungstène-diamant (WC-Diamond) sont largement utilisés dans les communications, les véhicules électriques et les domaines militaires. Dans les modules RF de station de base 5G/6G, le substrat prend en charge les dispositifs de puissance haute fréquence (tels que GaN HEMT,  $> 10 \text{ GHz} \pm 1 \text{ GHz}$ ) et une densité de puissance élevée ( $> 200 \text{ W/cm}^2 \pm 20 \text{ W/cm}^2$ ), et est utilisé pour la dissipation thermique des antennes et des amplificateurs RF, répondant à une conductivité thermique ultra-élevée ( $320 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) et une isolation ( $> 10^{13} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{12}$ ). Dans l'électronique de puissance des véhicules électriques, le substrat est utilisé dans les onduleurs et les contrôleurs de pile de charge pour optimiser les performances du cycle thermique ( $> 5000$  fois  $\pm 500$  fois) et la résistance aux hautes températures ( $> 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), prendre en charge une puissance de charge rapide ( $> 350 \text{ kW} \pm 10 \text{ kW}$ ) et un fonctionnement efficace du système de gestion de la batterie.

Français Les serveurs de calcul haute performance s'appuient sur la structure à gradient et la couche de nano-dissipation thermique du substrat (résistance thermique  $< 0,2^\circ\text{C/W} \pm 0,02^\circ\text{C/W}$ ) pour réduire la contrainte thermique ( $< 15 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) et augmenter la surface de dissipation thermique ( $> 300 \text{ cm}^2 \pm 20 \text{ cm}^2$ ), soutenant ainsi les performances stables des accélérateurs d'IA et des centres de données. Les systèmes radar militaires utilisent la résistance mécanique (résistance à la flexion  $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) et la résistance à l'usure (dureté HV  $8000 \pm 500$ ) du substrat pour répondre à l'utilisation à long terme des modules radar et des systèmes de contre-mesures électroniques dans des environnements extrêmes (stabilité thermique  $> 500$  heures  $\pm 50$  heures). Les équipements avioniques (tels que les modules de commandes de vol et les alimentations des satellites) s'appuient sur la résistance aux hautes températures et l'uniformité de la dissipation thermique du substrat (gradient de température  $< 5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ ) pour améliorer la fiabilité et la durée de vie des

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

équipements.

Dans le secteur de l'électronique grand public, les substrats répondent aux besoins de dissipation thermique des appareils AR/VR et des consoles de jeux hautes performances, et s'adaptent aux applications haute fréquence et à courant ultra-élevé ( $> 100 \text{ A} \pm 5 \text{ A}$ ). L'automatisation industrielle et les appareils IoT (tels que les cartes de contrôle d'usine intelligentes) utilisent la gestion thermique adaptative du substrat (temps de réponse  $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ ) et la surface micro-usinée au laser (optimisation de la rugosité) pour améliorer l'efficacité de la production ( $> 20 \% \pm 2 \%$ ) et réduire les coûts de maintenance ( $< 5 \% \pm 1 \%$ ). Avec le développement de la technologie des ondes millimétriques 6G, les substrats peuvent relever les défis de dissipation thermique des futures communications haute fréquence et de l'électronique de puissance grâce à l'optimisation et à la conception de microstructures pilotées par l'IA.

### **Substrat composite de dissipation thermique en carbure de tungstène et nitrure d'aluminium (WC- AlN )**

#### **thermique composite en carbure de tungstène-nitrure d'aluminium (WC- AlN ) ?**

carbure de tungstène-nitrure d'aluminium (WC- AlN ) est un matériau hautes performances conçu pour la gestion thermique des composants électroniques haute fréquence et des équipements médicaux. Il est principalement utilisé dans les dispositifs électroniques haute fréquence (modules RF, radars micro-ondes, équipements de communication par satellite), l'électronique médicale (amplificateurs de puissance IRM, équipements à ultrasons) et les capteurs industriels. Composé de WC et d'AlN (rapport volumique  $50:50 \pm 1 \%$ ), il est préparé par frittage à froid ( $1200 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) et recuit à haute température ( $1300 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , protection à l'azote) afin de garantir la densité du matériau (porosité  $< 0,7 \% \pm 0,1 \%$ ) et l'adaptation thermique. La conductivité thermique du substrat est de  $160 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , et l'isolation est  $> 10^{14} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{13} \Omega\cdot\text{cm}$ , épaisseur  $0,4\text{-}0,6 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ , coefficient de dilatation thermique adapté au silicium ( $4,5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$ , écart  $< 0,5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$ ).

Le substrat combine l'isolation élevée de l'AlN et la résistance mécanique du WC (résistance à la flexion  $> 400 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ ), ce qui convient aux circuits haute fréquence (fréquence de fonctionnement  $> 20 \text{ GHz} \pm 2 \text{ GHz}$ ) et aux environnements à haute température ( $> 250 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), et présente une durabilité mécanique élevée ( $> 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois). La surface est revêtue de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (épaisseur  $0,5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ ) pour améliorer la résistance à l'humidité (résistance à l'humidité  $> 95 \% \text{ HR} \pm 2 \% \text{ HR}$ ) et la résistance aux chocs thermiques ( $> 1000$  fois  $\pm 100$  fois), et la technologie d'oxydation par micro-arc est utilisée pour optimiser la force de liaison de l'interface (force d'adhérence  $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ). Combinant une conception à gradient multicouche (teneur en AlN  $40\%\text{-}60\% \pm 1\%$ ) et une couche de séparation thermoélectrique (épaisseur  $0,02\text{-}0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), le substrat utilise une technologie de dispersion de particules à l'échelle nanométrique (taille des particules  $< 10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ ) pour améliorer l'uniformité de la conductivité thermique ( $< 2^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ) et réduire la contrainte thermique ( $< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ), répondant aux besoins de dissipation

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

thermique efficace.

### **Performances du substrat de dissipation thermique composite en carbure de tungstène et nitrure d'aluminium (WC- AlN )**

Français Le substrat a une conductivité thermique élevée ( $160 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), une excellente isolation ( $>10^{14} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{13} \Omega\cdot\text{cm}$ ), une résistance mécanique élevée (résistance à la flexion  $>400 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ ) et une adaptation thermique (écart  $< 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ). Le revêtement  $\text{Si}_3\text{N}_4$  améliore la résistance à l'humidité ( $> 95 \% \text{ HR} \pm 2 \% \text{ HR}$ ) et la résistance aux chocs thermiques ( $> 1000 \text{ fois} \pm 100 \text{ fois}$ ), la structure à gradient multicouche optimise l'uniformité de la conductivité thermique ( $< 2 ^\circ\text{C} \pm 0,2 ^\circ\text{C}$ ) et la couche de séparation thermoélectrique réduit la contrainte thermique ( $< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ). La technologie de dispersion de particules à l'échelle nanométrique améliore la durabilité ( $> 2 \times 10^6 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ ), prend en charge les environnements à haute température ( $> 250 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$ ) et les applications à haute fréquence ( $> 20 \text{ GHz} \pm 2 \text{ GHz}$ ).

### **substrats de dissipateur thermique composites en carbure de tungstène et nitrure d'aluminium (WC- AlN )**

#### **Substrat standard**

À base de revêtement WC- AlN 50:50 et  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , adapté aux modules RF, épaisseur  $0,4\text{-}0,6 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ , conductivité thermique  $160 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .

#### **Substrat haute température**

Couche de séparation thermoélectrique ajoutée ( $0,02\text{-}0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), résistance à la chaleur  $> 250 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$ , adaptée à l'amplificateur de puissance IRM.

#### **Substrat haute fréquence**

Structure de gradient optimisée (AlN 40%-60% $\pm 1\%$ ), prenant en charge les circuits  $>20 \text{ GHz} \pm 2 \text{ GHz}$ , avec une uniformité  $< 2 ^\circ\text{C} \pm 0,2 ^\circ\text{C}$ .

#### **Substrats nano-améliorés**

Nanoparticules intégrées (taille des particules  $<10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ ), contrainte thermique  $<10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ , adaptées au radar micro-ondes.

### **substrat de dissipation thermique composite en carbure de tungstène-nitrure d'aluminium (WC- AlN )**

en carbure de tungstène-nitrure d'aluminium (WC- AlN ) sont largement utilisés dans les domaines de l'électronique haute fréquence, de la médecine et de l'aéronautique. Dans les dispositifs électroniques haute fréquence, ce substrat prend en charge les circuits haute fréquence ( $> 20 \text{ GHz} \pm 2 \text{ GHz}$ ) des modules RF, des radars micro-ondes et des équipements de communication par satellite. Grâce à une isolation élevée ( $> 10^{14} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{13} \Omega\cdot\text{cm}$ ) et une conductivité thermique ( $160 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), il répond aux exigences de dissipation thermique des stations de base et des antennes de communication 5G/6G. En électronique médicale, les substrats sont utilisés dans les amplificateurs de puissance IRM et les équipements à ultrasons pour optimiser la correspondance

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

thermique (écart  $< 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) et la résistance aux hautes températures ( $> 250 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$ ), et améliorer la précision et la fiabilité des équipements (rendement  $> 98 \% \pm 1 \%$ ).

Les capteurs industriels, tels que les capteurs de température et de pression pour les usines intelligentes, s'appuient sur la durabilité mécanique ( $> 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois) et la résistance aux chocs thermiques ( $> 1\,000$  fois  $\pm 100$  fois) du substrat pour soutenir l'automatisation et la maintenance prédictive de l'Industrie 4.0 (réduction des temps d'arrêt de  $> 15 \% \pm 2 \%$ ). L'avionique, comme les systèmes de contrôle de vol et les modules de navigation, utilise la légèreté (épaisseur  $0,4\text{--}0,6 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) et la résistance mécanique élevée ( $> 400 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ ) du substrat pour répondre à une utilisation à long terme dans des environnements extrêmes (stabilité thermique  $> 500$  heures  $\pm 50$  heures). Les dispositifs médicaux intelligents tels que les moniteurs de fréquence cardiaque implantables et les appareils à ultrasons portables s'appuient sur la résistance à l'humidité ( $> 95 \% \text{ HR} \pm 2 \% \text{ HR}$ ) et la conception en gradient du substrat pour optimiser l'uniformité de la dissipation thermique ( $< 2 ^\circ\text{C} \pm 0,2 ^\circ\text{C}$ ) et réduire les contraintes thermiques ( $< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ).

Dans le domaine de l'électronique grand public, les substrats répondent aux besoins de dissipation thermique des appareils de calcul haute performance et des terminaux de communication, et s'adaptent aux environnements à haute température et haute fréquence. L'électronique de défense, comme les systèmes de contre-mesures électroniques et les modules radar, utilise la résistance à la corrosion et la technologie de nano-amélioration des substrats pour répondre aux exigences de fiabilité et de durabilité de niveau militaire ( $> 2 \times 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois). Avec le développement des radars à ondes millimétriques, des accélérateurs de réseaux neuronaux et des dispositifs biomédicaux, les substrats améliorent encore l'efficacité de la dissipation thermique ( $> 20 \% \pm 2 \%$ ) et les performances de gestion thermique grâce à l'optimisation de l'IA et aux couches de séparation thermoélectrique, favorisant ainsi la généralisation des applications de haute technologie à l'avenir.

### **Substrat de dissipation thermique composite en carbure de tungstène et carbure de silicium (WC- SiC )**

#### **thermique composite en carbure de tungstène-carbure de silicium (WC- SiC ) ?**

carbure de tungstène-carbure de silicium (WC- SiC ) est un matériau de gestion thermique haute performance conçu pour les applications industrielles et à forte puissance. Il est principalement utilisé dans les lasers de forte puissance, les onduleurs électroniques de puissance, les systèmes de contrôle d'automatisation industrielle et les équipements de traction ferroviaire. Il est composé de WC et de SiC (carbure de silicium, granulométrie  $15\text{--}40 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ , rapport volumique  $65:35 \pm 1 \%$ ), préparé par diffusion par pressage à chaud ( $1\,350 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$ ,  $60 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$ ) pour garantir la densité du matériau (porosité  $< 0,9 \% \pm 0,1 \%$ ) et la stabilité thermique. Le substrat a une conductivité thermique de  $180 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , un coefficient de dilatation thermique de  $4,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , une épaisseur de  $0,6\text{--}1,2 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$  et une résistance à la température de  $> 450 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$  (durée de vie du cycle thermique  $> 1\,000$  heures  $\pm 100$  heures). Français Le substrat combine la conductivité thermique élevée du SiC ( $> 200 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) et la résistance à la corrosion

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

du WC (résistance aux acides  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), ce qui le rend adapté aux appareils haute tension (tels que  $1000 \text{ V} \pm 50 \text{ V}$ ) et aux applications à haute densité de puissance ( $> 150 \text{ W/cm}^2 \pm 15 \text{ W/cm}^2$ ), et présente une résistance mécanique élevée (résistance aux chocs  $> 600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ). La surface est revêtue de TiSiN (épaisseur  $5-10 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,2 \text{ } \mu\text{m}$ ) pour améliorer la résistance à l'oxydation et à l'usure (dureté HV  $2500 \pm 100$ ), et l'adhérence du revêtement ( $> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) est optimisée par la technologie de projection plasma. Associé à une structure poreuse (porosité  $1\%-3\% \pm 0,1\%$ ) et à un renfort en fibre de carbone (teneur  $1\%-2\% \pm 0,1\%$ ), le substrat augmente la surface de dissipation thermique ( $> 200 \text{ cm}^2 \pm 10 \text{ cm}^2$ ) et la résistance aux chocs ( $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ), répondant ainsi à des exigences de fiabilité élevées.

### **Performances du substrat de dissipation thermique composite carbure de tungstène-carbure de silicium (WC- SiC )**

Français Le substrat a une conductivité thermique élevée ( $180 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), un faible coefficient de dilatation thermique ( $4,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), une résistance mécanique élevée (résistance aux chocs  $> 600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) et une résistance aux températures élevées ( $> 450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , durée de vie du cycle thermique  $> 1000 \text{ heures} \pm 100 \text{ heures}$ ). Le revêtement TiSiN améliore la résistance à l'oxydation et à l'usure (dureté HV  $2500 \pm 100$ ) et présente une excellente résistance à la corrosion (résistance aux acides  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ). La structure poreuse augmente la zone de dissipation thermique ( $> 200 \text{ cm}^2 \pm 10 \text{ cm}^2$ ) et le renfort en fibre de carbone optimise la résistance aux chocs ( $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ), prenant en charge les applications haute tension ( $1000 \text{ V} \pm 50 \text{ V}$ ) et haute densité de puissance ( $> 150 \text{ W/cm}^2 \pm 15 \text{ W/cm}^2$ ).

### **substrats de dissipateur thermique composites en carbure de tungstène et carbure de silicium (WC- SiC )**

#### **Substrat standard**

À base de revêtement WC - SiC 65:35 et TiSiN, adapté aux machines de découpe laser, épaisseur  $0,6-1,2 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ , conductivité thermique  $180 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .

#### **Substrat haute température**

Durée de vie du cycle thermique optimisée ( $> 1000 \text{ heures} \pm 100 \text{ heures}$ ), résistance à la chaleur  $> 450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , convient aux onduleurs électroniques de puissance.

#### **Substrat poreux**

Structure poreuse intégrée (porosité  $1\%-3\% \pm 0,1\%$ ), surface de dissipation thermique  $> 200 \text{ cm}^2 \pm 10 \text{ cm}^2$ , adaptée aux convertisseurs d'énergie éolienne.

#### **Substrat amélioré**

Avec l'ajout de fibre de carbone ( $1\%-2\% \pm 0,1\%$ ), la résistance aux chocs est  $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ , ce qui convient aux robots industriels.

### **substrat de dissipation thermique composite en carbure de tungstène et carbure de silicium (WC- SiC )**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les substrats composites de dissipation thermique en carbure de tungstène et carbure de silicium (WC- SiC ) sont largement utilisés dans les secteurs de l'industrie et de l'énergie de forte puissance. Dans les lasers de forte puissance, ces substrats supportent une densité de puissance élevée ( $> 150 \text{ W/cm}^2 \pm 15 \text{ W/cm}^2$ ) et une résistance aux températures élevées ( $> 450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) des machines de découpe laser et des équipements de soudage, améliorant ainsi l'efficacité du traitement et la durée de vie des équipements. Dans les onduleurs électroniques de puissance, ces substrats sont utilisés dans les convertisseurs d'énergie éolienne et solaire pour optimiser la conductivité thermique ( $180 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) et la résistance à la corrosion (résistance aux acides  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), répondant ainsi aux exigences de haute tension ( $1\,000 \text{ V} \pm 50 \text{ V}$ ).

Français Les systèmes de contrôle d'automatisation industrielle s'appuient sur la résistance mécanique (résistance aux chocs  $> 600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) et la structure poreuse (surface de dissipation thermique  $> 200 \text{ cm}^2 \pm 10 \text{ cm}^2$ ) du substrat pour soutenir le fonctionnement stable des robots industriels et des équipements de fabrication intelligents. Les équipements de traction ferroviaire utilisent la durée de vie du cycle thermique ( $> 1000 \text{ heures} \pm 100 \text{ heures}$ ) et le renforcement en fibre de carbone (résistance aux chocs  $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) du substrat pour assurer une fiabilité élevée (rendement  $> 98 \% \pm 1 \%$ ) des onduleurs de traction haute tension et des modules de contrôle. L'électronique aérospatiale telle que les systèmes de commandes de vol et l'électronique de défense (comme les modules d'alimentation radar) s'appuient sur la résistance aux hautes températures et à l'oxydation (dureté HV  $2500 \pm 100$ ) du substrat pour répondre à une utilisation à long terme dans des environnements extrêmes.

Dans le domaine des énergies vertes, les substrats assurent une dissipation thermique efficace des bornes de recharge des véhicules électriques et des systèmes de stockage d'énergie, et s'adaptent aux exigences de densité de puissance élevée et de stabilité thermique. L'électronique grand public, comme les serveurs hautes performances et les capteurs industriels, utilise un substrat léger (épaisseur  $0,6\text{-}1,2 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) et un revêtement TiSiN pour optimiser l'efficacité de production (augmentation  $> 20 \% \pm 2 \%$ ) et réduire les coûts de maintenance ( $< 5 \% \pm 1 \%$ ). Avec le développement de l'Industrie 4.0 et des énergies renouvelables, les substrats répondent mieux aux besoins futurs de l'électronique industrielle haute fiabilité et des équipements d'énergie verte grâce à une conception multicouche et à l'optimisation de l'IA.

## **(5) Substrat de dissipation thermique composite en carbure de tungstène et nitrure de bore (WC-BN)**

### **substrat de dissipation thermique composite carbure de tungstène-nitrure de bore (WC-BN) ?**

Le substrat composite de dissipation thermique en carbure de tungstène-nitrure de bore (WC-BN) est un matériau hautes performances conçu pour la gestion thermique des instruments de haute précision et de l'électronique de défense. Il est principalement utilisé pour les instruments de haute précision (tels que les modules de puissance de lithographie, les équipements de gravure par faisceau d'électrons), l'électronique de défense (tels que les processeurs de signaux radar, les systèmes de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

guidage de missiles) et les équipements de recherche scientifique. Il est composé de WC et de BN (nitrure de bore, granulométrie  $10-30\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$ , rapport volumique  $55:45 \pm 1\%$ ) et est préparé par pressage isostatique (HIP,  $1250\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $160\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ) afin de garantir la densité du matériau (porosité  $< 0,5\% \pm 0,1\%$ ) et sa stabilité thermique. Français La conductivité thermique du substrat est de  $200\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ , et l'isolation est  $> 10^{15}\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{14}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ , épaisseur  $0,3-0,5\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ , coefficient de dilatation thermique  $4,2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , résistance mécanique élevée (résistance à la compression  $> 3500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ ). Le substrat combine l'isolation ultra-élevée du BN et la résistance mécanique du WC, adapté aux applications ultra-haute fréquence ( $> 50\text{ GHz} \pm 5\text{ GHz}$ ) et aux environnements extrêmes ( $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , stabilité thermique  $> 600\text{ heures} \pm 50\text{ heures}$ ). Français La surface est revêtue d'AlN (épaisseur  $1-2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$ ) pour améliorer la résistance à l'humidité (résistance à l'humidité  $> 98\% \text{ HR} \pm 1\% \text{ HR}$ ) et la stabilité thermique, et la force de liaison de l'interface est optimisée par traitement de surface au laser (force d'adhérence  $> 55\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ). Combinant un composite à gradient multicouche (teneur en BN  $40\%-60\% \pm 1\%$ ) et une couche d'isolation thermoélectrique (épaisseur  $0,01-0,03\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ ), le substrat optimise l'uniformité de la conductivité thermique ( $< 1,5^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ) et réduit les interférences électromagnétiques ( $< 0,1\text{ dB} \pm 0,01\text{ dB}$ ) grâce à une technologie de dispersion à l'échelle nanométrique pour répondre aux exigences de très haute précision et d'environnements extrêmes.

### Performances du substrat de dissipation thermique composite en carbure de tungstène et nitrure de bore (WC-BN)

Français Le substrat a une conductivité thermique élevée ( $200\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), une excellente isolation ( $> 10^{15}\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{14}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ ), une résistance mécanique élevée (résistance à la compression  $> 3500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ ) et un faible coefficient de dilatation thermique ( $4,2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ). Le revêtement AlN améliore la résistance à l'humidité ( $> 98\% \text{ HR} \pm 1\% \text{ HR}$ ) et la stabilité thermique ( $> 600\text{ heures} \pm 50\text{ heures}$ ), la structure à gradient multicouche optimise l'uniformité de la conductivité thermique ( $< 1,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) et la couche d'isolation thermique réduit les interférences électromagnétiques ( $< 0,1\text{ dB} \pm 0,01\text{ dB}$ ). La technologie de dispersion à l'échelle nanométrique améliore la durabilité ( $> 2 \times 10^6\text{ fois} \pm 10^4\text{ fois}$ ), prend en charge les fréquences ultra-élevées ( $> 50\text{ GHz} \pm 5\text{ GHz}$ ) et les plages de températures extrêmes ( $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

### Types de substrats de dissipation thermique composites en carbure de tungstène et nitrure de bore (WC-BN)

#### Substrat standard

Basé sur le revêtement WC-BN 55:45 et AlN, il convient aux modules de puissance lithographiques d'une épaisseur de  $0,3-0,5\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$  et d'une conductivité thermique de  $200\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ .

#### Substrat haute température

Stabilité thermique optimisée ( $> 600\text{ heures} \pm 50\text{ heures}$ ), résistance à la chaleur  $> 300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , adaptée aux équipements de gravure par faisceau d'électrons.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Substrat haute fréquence

Couche d'isolation thermique et électrique intégrée ( $0,01-0,03 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), prend en charge les applications  $> 50 \text{ GHz} \pm 5 \text{ GHz}$  et  $\text{EMI} < 0,1 \text{ dB} \pm 0,01 \text{ dB}$ .

### Substrats nano-améliorés

Avec l'ajout d'une dispersion à l'échelle nanométrique (taille des particules  $< 10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ ), l'uniformité de la conductivité thermique est  $< 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , ce qui convient aux systèmes de guidage de missiles.

### Application d'un substrat composite de dissipation thermique en carbure de tungstène-nitrure de bore (WC-BN)

Les substrats composites de dissipation thermique en carbure de tungstène-nitrure de bore (WC-BN) sont largement utilisés dans les instruments de haute précision, l'électronique de défense et la recherche scientifique. Dans les équipements de fabrication de semi-conducteurs, ce substrat prend en charge les modules de puissance des équipements de lithographie EUV et de gravure par faisceau d'électrons. Grâce à une isolation ultra-élevée ( $> 10^{15} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ ) et une conductivité thermique ( $200 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ), ils répondent aux exigences de très haute précision pour une largeur de ligne  $< 2 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ . Dans l'électronique de défense, le substrat est utilisé dans les processeurs de signaux radar et les systèmes de guidage de missiles, optimisant les performances ultra-haute fréquence ( $> 50 \text{ GHz} \pm 5 \text{ GHz}$ ) et la résistance mécanique ( $> 3 \text{ 500 MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ), s'adaptant aux plages de températures extrêmes ( $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $300 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) et à la stabilité thermique ( $> 600 \text{ heures} \pm 50 \text{ heures}$ ).

Français Les équipements de recherche scientifique tels que les dispositifs expérimentaux de physique des hautes énergies et les modules de calcul quantique s'appuient sur le substrat léger (épaisseur  $0,3-0,5 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) et la couche d'isolation thermique pour réduire les interférences électromagnétiques ( $< 0,1 \text{ dB} \pm 0,01 \text{ dB}$ ) et améliorer l'uniformité de la dissipation thermique ( $< 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Les équipements avioniques tels que les systèmes de commandes de vol et les modules de communication par satellite utilisent la résistance à l'humidité du substrat ( $> 98 \% \text{ HR} \pm 1 \% \text{ HR}$ ) et la résistance à la corrosion pour répondre aux exigences de fiabilité et de durabilité de niveau aérospatial ( $> 2 \times 10^6 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ ). Les équipements médicaux intelligents tels que les systèmes d'IRM et d'imagerie par ultrasons de haute précision s'appuient sur l'adaptation thermique et la résistance mécanique élevée du substrat pour assurer la biocompatibilité et un fonctionnement stable dans des environnements à haute température.

Les systèmes de contrôle d'automatisation industrielle et les stations de base de communication utilisent la conception à gradient et la technologie de nano-amélioration des substrats pour optimiser l'efficacité de la production (augmentation  $> 20 \% \pm 2 \%$ ) et réduire les coûts de maintenance ( $< 5 \% \pm 1 \%$ ). Avec l'amélioration de la précision de la lithographie et la miniaturisation de l'électronique de défense, les substrats peuvent mieux répondre aux besoins des futurs instruments de très haute précision et des équipements électroniques pour environnements extrêmes grâce à l'optimisation pilotée par l'IA et aux structures multicouches, favorisant ainsi le développement rapide des

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

technologies des semi-conducteurs et de la défense.

### **Tendance de développement et perspectives de marché des substrats de dissipation thermique à base de carbure de tungstène**

pour ces substrats continue de croître en raison de l'intégration à haute densité de dispositifs électroniques ( $>10^6$  transistors/mm<sup>2</sup>  $\pm$   $10^5$  transistors/mm<sup>2</sup>), de la densité de puissance accrue ( $>100$  W/cm<sup>2</sup>  $\pm$   $10$  W/cm<sup>2</sup>) et de la température de fonctionnement plus élevée ( $>150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), en particulier dans les domaines des communications de nouvelle génération (6G), des véhicules à énergie nouvelle (systèmes de gestion de batterie, modules de charge rapide), des puces d'intelligence artificielle, de l'automatisation industrielle, de l'électronique de défense et des équipements médicaux intelligents. Français L'itération technologique des substrats de dissipation thermique en carbure cémenté s'accélère, avec l'ajout de procédés de fabrication avancés (tels que la dispersion de nanoparticules, le micro-usinage laser, l'impression 3D) et de traitements de surface (tels que le revêtement CVD, la projection plasma, le dépôt ALD), améliorant la conductivité thermique ( $> 300 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), l'isolation ( $> 10^{-5} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$ ), la résistance mécanique ( $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) et la durabilité ( $> 10^7$  fois  $\pm 10^5$  fois). La taille du marché devrait atteindre 3 milliards  $\pm$  300 millions de dollars américains, avec un taux de croissance annuel de 20 à 25 %, en particulier dans la recharge rapide des véhicules électriques ( $> 350 \text{ kW} \pm 10 \text{ kW}$ ), le radar à ondes millimétriques, les équipements informatiques quantiques et l'électronique biomédicale. À l'avenir, les substrats évolueront vers l'intelligence et la durabilité, intégrant des capteurs thermiques pour surveiller la température (précision  $< 0,1^\circ\text{C} \pm 0,01^\circ\text{C}$ ), une structure de dissipation thermique adaptative (résistance thermique  $< 0,1^\circ\text{C/W} \pm 0,01^\circ\text{C/W}$ ) et une conception recyclable (teneur en métaux lourds  $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$ ) afin de répondre aux multiples défis de l'industrie électronique en matière de dissipation thermique efficace, de fiabilité élevée et d'exigences environnementales. Parallèlement, les ajustements de la chaîne d'approvisionnement mondiale et la production régionale (comme en Chine de l'Est, en Allemagne en Europe et dans la Silicon Valley aux États-Unis) favoriseront davantage l'optimisation de l'implantation industrielle des substrats et la coopération internationale.

Cette section aborde deux aspects : les moules et substrats de dissipation thermique en carbure cémenté, ainsi que l'optimisation de la conductivité du carbure cémenté. Combinant mécanismes théoriques, données expérimentales et tendances du secteur, cette section analyse en profondeur ses caractéristiques de performance et ses axes d'amélioration, fournissant ainsi une base théorique et pratique complète pour les applications émergentes.

#### **14.1.3 Technologie, principes et améliorations des matrices en carbure cémenté et des substrats de dissipation thermique**

##### **Technologie et application des moules en carbure cémenté et des substrats de dissipation thermique**

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Les matrices et les dissipateurs thermiques en carbure cimenté jouent un rôle essentiel dans l'industrie électronique, assurant respectivement une fabrication de précision et une gestion thermique efficace. Les matrices en carbure cimenté sont largement utilisées dans le packaging de puces, l'emboutissage de microconnecteurs, l'usinage de précision au niveau des semi-conducteurs, le poinçonnage de circuits imprimés et dans des domaines émergents tels que l'électronique flexible et les systèmes microélectromécaniques (MEMS). Ces matrices requièrent une grande précision dimensionnelle ( $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), une excellente résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), une excellente résistance à la fatigue (durée de vie  $> 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois) et une forte stabilité à haute température (résistance à la température  $> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ).

Les substrats de dissipation thermique prennent en charge les dispositifs électroniques haute puissance, notamment les semi-conducteurs de puissance (tels que les IGBT, les MOSFET), les diodes laser, les modules de communication 5G/6G, les onduleurs de véhicules électriques et les puces d'intelligence artificielle. Ils doivent offrir une gestion thermique efficace (efficacité de dissipation thermique  $> 90\% \pm 2\%$ ), une faible résistance thermique ( $< 0,1 \text{ K} \cdot \text{cm}^2 / \text{W} \pm 0,01 \text{ K} \cdot \text{cm}^2 / \text{W}$ ) et une excellente isolation (résistivité volumique  $> 10^{12} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ) pour garantir que le dispositif puisse fonctionner à une densité de puissance élevée ( $> 100 \text{ W/cm}^2 \pm 10 \text{ W/cm}^2$ ) et un fonctionnement stable dans des environnements à haute température ( $> 150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ).

### **Matériaux et propriétés des moules en carbure cimenté et des substrats de dissipation thermique**

Le matériau de base des moules et des substrats de dissipation thermique en carbure cimenté est basé sur le système WC-Co, avec une teneur en cobalt (Co) comprise entre 6 % et 10 %  $\pm 1\%$ . La granulométrie des matières premières en carbure cimenté est strictement contrôlée, à  $0,5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ . Afin d'améliorer la conductivité thermique ( $> 100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ), du cuivre (Cu, 1 %-5 %  $\pm 0,5\%$ ) ou du nickel (Ni, 2 %-8 %  $\pm 0,5\%$ ) est dopé dans la matrice. De plus, du carbure de titane (TiC, 2 %-5 %  $\pm 0,5\%$ ) ou du carbure de tantale (TaC, 1 %-3 %  $\pm 0,5\%$ ) est ajouté pour améliorer la stabilité à haute température ( $> 900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) et la résistance aux chocs thermiques ( $> 10^4$  fois  $\pm 10^3$  fois).

### **Procédé de fabrication et traitement de surface des moules en carbure cimenté et des substrats de dissipation thermique**

Le procédé de fabrication utilise une technologie de frittage avancée. Le frittage par plasma d'étincelles (SPS) à  $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  et  $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$  permet un frittage rapide et une optimisation de la microstructure, tandis que la compression isostatique à chaud (CIC) à  $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  et  $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$  assure l'homogénéité et la densité du matériau (porosité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ ). L'état de surface est encore amélioré par un dépôt physique en phase vapeur (PVD) (par exemple, TiN). CrN ou AlTiN, épaisseur  $5\text{-}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) pour améliorer encore la résistance à l'usure (dureté jusqu'à HV 2000  $\pm 50$ ), la résistance à l'oxydation (taux de corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) et la lubrification (coefficient de frottement  $< 0,2 \pm 0,02$ ). Le chauffage rapide du

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

SPS ( $< 10 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$ ) et la pression uniforme du HIP peuvent minimiser les micropores (taille des pores  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), la séparation de phase et les défauts de joint de grain, et améliorer les propriétés mécaniques (résistance à la compression  $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ), la conductivité thermique ( $> 120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) et la durée de vie ( $> 10^6 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ ).

La technologie de polissage mécano-chimique (CMP) est utilisée sur certains substrats pour optimiser la rugosité de surface ( $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ ) et améliorer l'efficacité du contact thermique avec les composants électroniques (résistance thermique de contact  $< 0,05 \text{ K}\cdot\text{cm}^2 / \text{W} \pm 0,005 \text{ K}\cdot\text{cm}^2 / \text{W}$ ).

### Normes internationales pour les moules en carbure cimenté et les substrats de dissipation thermique

L'évaluation des performances des moules et dissipateurs thermiques en carbure cimenté est conforme à plusieurs normes internationales afin de garantir leur fiabilité dans l'industrie électronique. La dureté est testée selon la norme ASTM E92 (précision  $\pm 30 \text{ HV}$ ), le taux d'usure est mesuré selon la norme ASTM G65 (précision  $\pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ ), la conductivité thermique est évaluée selon la norme ASTM E1461 (précision  $\pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), la durée de vie est vérifiée par des essais de cycle sur site (précision  $\pm 10^4 \text{ fois}$ ), le coefficient de dilatation thermique est mesuré selon la norme ASTM E228 (précision  $\pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), et l'isolation électrique est testée selon la norme IEC 60167 (précision  $\pm 10^{11} \Omega\cdot\text{cm}$ ). Français Par exemple, la formule WC-8Co-2Cu a une dureté de  $\text{HV } 1800 \pm 30$ , une conductivité thermique de  $120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , un coefficient de dilatation thermique de  $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , une durée de vie du moule d'environ  $10^6 \text{ fois} \pm 10^5 \text{ fois}$  et une efficacité de dissipation thermique de  $92\% \pm 2\%$ , ce qui est nettement meilleur que la formule WC-10Co traditionnelle (conductivité thermique  $100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , efficacité  $88\% \pm 2\%$ ). Son amélioration des performances est due au réseau thermique formé par le dopage Cu et à l'effet de renforcement de la diffusion du TiC. Avec la demande de miniaturisation et de haute puissance des appareils électroniques, la norme ISO 13485 (Système de gestion de la qualité des dispositifs médicaux) a été introduite dans la production de certains substrats de dissipation thermique pour garantir la biocompatibilité et la fiabilité, en particulier dans les applications d'équipements médicaux intelligents.

### Mécanisme de performance de base du moule en carbure cimenté et du substrat de dissipation thermique

### Mécanisme de performance et fonction de la structure composite multiphasée en carbure cimenté

Français Les propriétés du carbure cimenté découlent de sa structure composite multiphasée, dans laquelle le WC (teneur  $> 90\% \pm 1\%$ ) en tant que phase dure offre une dureté élevée ( $\text{HV } 1800 \pm 30$ ) et une résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ ). La granulométrie ( $0,5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) améliore la résistance à la traction  $> 1500 \text{ MPa} \pm$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

50 MPa) et la résistance à l'usure grâce à l'effet Hall-Petch, réduisant ainsi la dégradation des performances causée par la diffusion aux joints de grains. Français La teneur en Co (6%-10% ± 1%) agit comme une phase liante pour améliorer la ténacité (ténacité à la rupture  $K_{IC}$  10-15 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0,5) et la résistance aux fissures (taux de croissance des fissures < 0,01 mm/cycle ± 0,001 mm/cycle), absorbant l'énergie par déformation plastique. Le dopage Cu/Ni (fraction volumique 2%-8% ± 0,5%) forme un réseau conducteur électrique et thermique, augmentant la conductivité thermique d'environ 20% ± 3% (de 100 W/m·K ± 5 W/m·K à 120 W/m·K ± 5 W/m·K). Français Le dopage TiC (2%-5% ± 0,5%) améliore la dureté à haute température (> HV 1900 ± 30 à 600°C ± 20°C) et la résistance à la fatigue thermique (> 10<sup>5</sup> fois ± 10<sup>4</sup> fois) grâce au renforcement par dispersion. L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) montre que la surface d'usure du moule WC-8Co-2Cu est lisse (rugosité Ra < 0,2 μm ± 0,01 μm), la spectroscopie dispersive en énergie (EDS) confirme que le Cu est uniformément distribué (écart < 0,1% ± 0,02%), et la diffraction des rayons X (DRX) détecte la distribution dispersée de la phase TiC (espacement des grains < 0,5 μm ± 0,01 μm), ce qui améliore la stabilité à haute température du matériau.

Théoriquement, la faible résistivité du Cu/Ni (< 2 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm) réduit la résistance thermique par diffusion électron-phonon, et les faibles caractéristiques de dilatation thermique du système WC-Co (< 6×10<sup>-6</sup> /°C ± 0,5×10<sup>-6</sup> /°C) assurent l'intégrité structurale pendant les cycles thermiques (taux de déformation < 0,01% ± 0,001%). Le revêtement PVD améliore l'indice de résistance à la corrosion à > 90 % ± 2 % en formant une couche protectrice dense (épaisseur 5-15 μm ± 0,1 μm, densité > 98 % ± 1 %), prolongeant considérablement la durée de vie (> 10<sup>6</sup> fois ± 10<sup>4</sup> fois), et en réduisant l'énergie de surface (< 40 mJ/m<sup>2</sup> ± 5 mJ/m<sup>2</sup>) pour réduire le collage.

### Mécanisme de gestion thermique du substrat de dissipation thermique et de sa synergie matérielle

Le mécanisme de gestion thermique du substrat du dissipateur thermique repose sur l'effet synergique des matériaux composites multiphasés. Le WC agit comme un squelette pour fournir un support mécanique et une résistance à haute température (> 1000 °C ± 50 °C), la phase Cu agit comme un réseau conducteur thermique pour transférer rapidement la chaleur (coefficient de diffusion thermique > 50 mm<sup>2</sup> / s ± 5 mm<sup>2</sup> / s), et la phase AlN ou diamant améliore encore la conductivité thermique locale et l'isolation (> 10<sup>13</sup> Ω·cm ± 10<sup>12</sup> Ω·cm). Français La réduction de la résistance thermique (< 0,1 K·cm<sup>2</sup> /W ± 0,01 K·cm<sup>2</sup> /W) est due à l'optimisation de l'interface (par exemple, la résistance de contact thermique de l'interface Cu-WC est < 0,01 K·cm<sup>2</sup> /W ± 0,001 K·cm<sup>2</sup> /W) et à la réduction des micropores (< 0,05 % ± 0,01 %). L'analyse par imagerie thermique infrarouge montre que le substrat composite WC-Cu a une faible conductivité thermique à 50 W/cm<sup>2</sup>. À une densité de puissance de ± 5 W/cm<sup>2</sup>, l'uniformité de la température de surface est < 5 °C ± 0,5 °C et l'efficacité de dissipation thermique est de 92 % ± 2 %, ce qui est meilleur que le substrat Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> traditionnel (efficacité 80 % ± 2 %). De plus, la dilatation thermique correspondante (< 0,5×10<sup>-6</sup> /°C ± 0,1×10<sup>-6</sup> /°C) réduit la contrainte thermique (< 10 MPa ± 1 MPa) avec la puce Si (coefficient de dilatation thermique 3,5-4,5×10<sup>-6</sup> /°C), améliorant la fiabilité à long terme (> 10<sup>5</sup> heures ± 10<sup>4</sup> heures).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Principaux facteurs affectant les performances des moules en carbure cimenté et des substrats de dissipation thermique

### Effet de la teneur en Cu/Ni du carbure cimenté sur les propriétés

La teneur en Cu/Ni ( $1\%-5\% \pm 0,5\%$ ) améliore la conductivité thermique et électrique (conductivité thermique  $>120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , conductivité électrique  $>10^6 \text{ S/m} \pm 10^5 \text{ S/m}$ ) en formant un réseau électriquement et thermiquement conducteur, mais une teneur  $>10\% \pm 0,5\%$  conduit à une diminution de la dureté d'environ  $10\% \pm 2\%$  (de  $\text{HV } 1800 \pm 30$  à  $\text{HV } 1600 \pm 30$ ) et à une augmentation du coefficient de dilatation thermique ( $>7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), affectant la précision du moule (écart  $>0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) et la stabilité du cyclage thermique du substrat de dissipation thermique (taux de déformation)  $>0,02\% \pm 0,002\%$ . L'optimisation du rapport (par exemple, WC-8Co-2Cu) peut améliorer la conductivité thermique de  $20\% \pm 3\%$  tout en maintenant la dureté ( $\text{HV } 1800 \pm 30$ ).

### Contrôle de la granulométrie des matières premières en carbure cimenté sur les performances

La granulométrie ( $0,5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) assure la résistance à l'usure et la conductivité thermique grâce à l'effet Hall-Petch (taux d'usure  $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , conductivité thermique  $>120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), mais  $>2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  augmentera le taux d'usure d'environ  $10\% \pm 2\%$  (à  $0,055 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ) et la conductivité thermique diminuera d'environ  $5\% \pm 1\%$  (à  $114 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) en raison de la diffusion accrue des joints de grains et des chemins de conduction thermique raccourcis. Des grains à l'échelle nanométrique (par exemple  $0,2\text{-}0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) ont été obtenus grâce à des procédés de broyage à boulets et SPS, améliorant encore la dureté ( $>\text{HV } 1900 \pm 30$ ) et la durabilité ( $>1,5 \times 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois), adaptés à l'usinage ultra-précis.

### L'effet équilibrant de la teneur en Co du carbure cimenté sur les performances

La teneur en Co ( $6\%\text{-}10\% \pm 1\%$ ) équilibre la ténacité et la dureté (dureté  $\text{HV } 1800 \pm 30$ , ténacité  $K_{IC} 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ),  $<6\% \pm 1\%$  augmente le taux de fissure d'environ  $10\% \pm 2\%$  (longueur de fissure  $>0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ),  $>12\% \pm 1\%$  réduit la dureté d'environ  $5\% \pm 1\%$  (à  $\text{HV } 1700 \pm 30$ ) et la conductivité thermique d'environ  $3\% \pm 1\%$  (à  $116 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ). L'optimisation de la teneur en Co (par exemple  $8\% \pm 0,5\%$ ) se traduit par une porosité  $<0,05\% \pm 0,01\%$  sous procédé SPS, garantissant une grande fiabilité des moules et des substrats.

### Optimisation de l'effet du procédé de frittage du carbure cimenté sur les performances

Français La porosité du carbure cimenté SPS est  $<0,1\% \pm 0,01\%$  (temps de frittage  $<5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$ ), et le HIP la réduit encore à  $<0,05\% \pm 0,01\%$  (uniformité de pression  $>95\% \pm 2\%$ ). La conductivité thermique du frittage conventionnel (compaction + frittage à haute température,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1500 °C ± 10 °C) est réduite d'environ 10 % ± 2 % (à 108 W/ m·K ± 5 W/ m·K ) en raison d'une porosité accrue (> 0,2 % ± 0,02 %) et d'une inhomogénéité de phase (agglomération WC > 5 % ± 1 %). Le procédé composite SPS combiné au HIP peut augmenter la conductivité thermique à 125 W/ m·K ± 5 W/ m·K , ce qui convient aux substrats de dissipation thermique hautes performances.

### **L'influence des conditions de charge du carbure cimenté sur la stabilité de ses performances**

Performances stables dans des conditions de charge 100-1000 N ± 10 N (taux d'usure < 0,05 mm<sup>3</sup> / N · m ± 0,01 mm<sup>3</sup> / N · m , déformation < 0,01 % ± 0,001 %), > 5000 N ± 10 N entraîne une augmentation de l'usure d'environ 15 % ± 3 % (à 0,057 mm<sup>3</sup> / N · m ) ± 0,01 mm<sup>3</sup> / N · m ) et initie des microfissures (longueur > 0,02 mm ± 0,005 mm), > 10000 N ± 10 N peut entraîner un effondrement du matériau (taux de fracture > 5 % ± 1 %). Par exemple, le WC-10Co (sans dopage Cu) a une conductivité thermique de seulement 100 W/ m·K ± 5 W/ m·K et un coefficient de dilatation thermique de  $6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  sous une charge de 5000 N ± 10 N , tandis que le WC-8Co-2Cu reste stable dans les mêmes conditions (conductivité thermique 120 W/ m·K ± 5 W/ m·K , coefficient de dilatation thermique  $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ).

### **L'influence des facteurs environnementaux sur la durée de vie du carbure cimenté et sa protection**

L'humidité ambiante (> 90 % HR ± 2 % HR), la température (> 200 °C ± 10 °C) et les milieux corrosifs (tels qu'une solution HCl) accélèrent la dégradation des matériaux. Le revêtement PVD peut prolonger la durée de vie jusqu'à > 10<sup>6</sup> fois ± 10<sup>4</sup> fois, tandis que la durée de vie des substrats traditionnels non revêtus est réduite à < 5 × 10<sup>5</sup> fois ± 10<sup>4</sup> fois. En 2025, la fabrication verte exige la réduction de l'utilisation de Co (< 5 % ± 0,5 %) et encourage la recherche de substitution au Ni ou au Cr afin de respecter les réglementations environnementales (telles que les normes RoHS).

### **Optimisation et amélioration des performances des moules en carbure et des substrats de dissipation thermique**

#### **Stratégie d'optimisation des matériaux en carbure cimenté et ajustement de la formulation**

L'optimisation des performances commence par un ajustement précis de la formulation du matériau. La teneur en Co est contrôlée à 6%-10% ± 1% pour assurer la ténacité (ténacité à la rupture K<sub>1c</sub> 10-15 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0,5) et la résistance aux fissures (taux de croissance des fissures < 0,01 mm/cycle ± 0,001 mm/cycle) en tant que phase liante, la quantité de dopage Cu est fixée à 1%-5% ± 0,5% pour former un réseau conducteur thermique (conductivité thermique augmentée à > 120 W/ m·K ± 5 W/ m·K ), et la quantité de dopage TiC est de 2%-5% ± 0,5% pour améliorer la dureté à haute température (> HV 1900 ± 30 à 600°C ± 20°C) et la résistance à la fatigue thermique (> 10<sup>5</sup> fois ± 10<sup>4</sup> fois) grâce au renforcement par dispersion. Le carbure de vanadium (VC, 0,2 % ± 0,01 %) et le TaC (0,1 % ± 0,01 %) ont été introduits comme inhibiteurs de croissance des grains pour maintenir la taille des grains à 0,5-1 µm ± 0,01 µm et optimiser l'effet Hall-Petch pour améliorer

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

la résistance ( $> 1\,500\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ ) et la résistance à l'usure (taux d'usure jusqu'à  $0,03\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ).

Pour améliorer encore les performances, des phases de renforcement à l'échelle nanométrique (telles que la nanopoudre de WC, taille des particules  $< 100\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$ , teneur  $0,5\% - 1\% \pm 0,1\%$ ) peuvent être explorées pour réduire les défauts aux limites des grains ( $< 0,01\% \pm 0,001\%$ ) grâce à une dispersion uniforme, améliorer la conductivité thermique ( $> 130\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) et l'efficacité de dissipation thermique ( $> 94\% \pm 2\%$ ). En 2025, les exigences de protection de l'environnement devenant plus strictes, certaines formulations tenteront de remplacer une partie du Co par du Ni ou du Cr (taux de remplacement  $< 20\% \pm 2\%$ ) pour réduire la teneur en métaux lourds ( $< 0,5\% \pm 0,1\%$ ), répondre aux normes RoHS et REACH, tout en conservant les propriétés mécaniques (dureté  $\text{HV } 1800 \pm 30$ , ténacité  $K_{IC} 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ).

### Amélioration et innovation technologique du procédé de fabrication du carbure cémenté

L'optimisation du processus de fabrication est la clé pour améliorer les performances du carbure cémenté. Le frittage par plasma d'étincelles (SPS,  $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$ ) combiné au pressage isostatique à chaud (HIP,  $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ) peut optimiser considérablement la microstructure. Le SPS réduit la porosité ( $< 0,1\% \pm 0,01\%$ ) et la séparation de phases (agglomération WC  $< 2\% \pm 0,5\%$ ) grâce à un chauffage rapide ( $< 10\text{ min} \pm 1\text{ min}$ ) et un frittage haute pression. Le HIP réduit davantage les micropores (diamètre des pores  $< 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ ) et améliore la densité ( $> 99\% \pm 0,5\%$ ) grâce à une pression uniforme ( $> 95\% \pm 2\%$ ). Afin d'éliminer les oxydes et les impuretés de surface, une technologie de nettoyage au plasma a été introduite (puissance  $500\text{ W} \pm 50\text{ W}$ , temps  $5-10\text{ min} \pm 0,5\text{ min}$ ), qui a réduit efficacement l'épaisseur de la couche d'oxyde ( $< 0,01\text{ }\mu\text{m} \pm 0,001\text{ }\mu\text{m}$ ) et amélioré l'adhérence des revêtements ultérieurs ( $> 60\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ).

De plus, le frittage par micro-ondes ( $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $20\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$ ) peut être exploré comme une alternative à faible consommation d'énergie pour raccourcir le temps de frittage ( $< 5\text{ min} \pm 0,5\text{ min}$ ) et améliorer l'uniformité de la distribution de la phase conductrice thermique (comme le Cu) (écart  $< 0,1\% \pm 0,02\%$ ), et la conductivité thermique peut atteindre  $125\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ . En 2025, la technologie de fabrication additive (telle que la fusion laser sélective SLM, épaisseur de couche  $20-50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ) a commencé à être appliquée à la production de moules et de substrats à structure complexe, intégrant des microcanaux (diamètre  $0,02-0,05\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ ) ou des réseaux de dissipation thermique en nid d'abeille, améliorant considérablement l'efficacité de la dissipation thermique ( $> 95\% \pm 2\%$ ) et la stabilité du cycle thermique ( $> 6\,000\text{ fois} \pm 500\text{ fois}$ ).

### Optimisation et amélioration fonctionnelle du traitement de surface en carbure cémenté

la dissipation thermique du carbure cémenté. La technologie de polissage de précision (comme le polissage mécano-chimique CMP) contrôle la rugosité de surface à  $R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ , réduit la résistance thermique de contact ( $< 0,05\text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W} \pm 0,005\text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ ) et améliore l'efficacité de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

liaison avec les composants électroniques ( $> 98 \% \pm 1 \%$ ). L'application d'un revêtement PVD multicouche (tel que TiN / CrN ou AlTiN , épaisseur  $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  , en utilisant la technologie de placage ionique multi-arc) peut améliorer la résistance à l'usure d'environ  $10 \% \pm 2 \%$  (taux d'usure réduit à  $0,027 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), la résistance à la corrosion (test au brouillard salin  $> 600 \text{ heures} \pm 50 \text{ heures}$ ) et la stabilité à haute température ( $> 900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) sont améliorées d'environ  $15 \% \pm 2 \%$ , et le taux d'oxydation ( $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) est réduit en formant une couche protectrice dense (densité  $> 98 \% \pm 1 \%$ ).

Pour faire face à des environnements complexes, des revêtements nanocomposites (tels que TiN /  $\text{Al}_2\text{O}_3$  , épaisseur  $10-20 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$  ) ou des revêtements auto-cicatrisants (contenant des microcapsules, taux de réparation  $> 90 \% \pm 2 \%$ ) peuvent être introduits pour réparer automatiquement la surface lorsque de l'usure ou des fissures se produisent (profondeur de réparation  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), prolongeant la durée de vie à  $> 1,5 \times 10^6 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ . En 2025, la technologie de fonctionnalisation de surface ( telle que la microtexture laser , rugosité Ra  $0,05-0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  ) a été utilisée pour améliorer l'hydrophilie (angle de contact  $< 30^\circ \pm 5^\circ$ ) et la lubrification (coefficient de frottement  $< 0,15 \pm 0,02$ ) des substrats de dissipation thermique, et optimiser les performances de gestion thermique des dispositifs haute puissance (tels que les HEMT GaN ).

### **Méthode de test et de vérification des performances du carbure cémenté et analyse des résultats**

L'optimisation des performances doit être vérifiée par des tests standardisés et des méthodes analytiques avancées. La dureté est testée selon la norme ASTM E92 (précision  $\pm 30 \text{ HV}$ ), la conductivité thermique est mesurée selon la norme ASTM E1461 (précision  $\pm 5 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$  ), le coefficient de dilatation thermique est évalué selon la norme ASTM E228 (précision  $\pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ), complété par un essai de cycle thermique ( $500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ,  $1\,000 \text{ fois} \pm 50 \text{ fois}$ ) pour vérifier la durabilité et la stabilité thermique (taux de déformation  $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$ ), et une analyse par diffraction des rayons X (DRX) de la stabilité de phase (pureté de la phase cristalline  $> 95 \% \pm 2 \%$ ).

Vérification : La morphologie, la distribution de la composition et les caractéristiques des joints de grains ont été analysées par microscopie électronique à balayage (MEB, résolution  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  ) , spectroscopie dispersive en énergie (EDS, écart de composition  $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ) et microscopie électronique à transmission (MET, résolution des joints de grains  $< 0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$  ) . Par exemple, le taux d'usure de la formulation WC-8Co-2Cu-3TiC (taille des grains  $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  ) est de  $0,03 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , conductivité thermique  $125 \text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$  , efficacité de dissipation thermique  $93 \% \pm 2 \%$ , meilleur que le WC-10Co traditionnel (taux d'usure  $0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , conductivité thermique  $100 \text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$  ). Français Les futures directions de recherche incluent le renforcement des nanoparticules (comme la nanopoudre de WC , taille des particules  $< 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ , teneur  $1\% \pm 0,1\%$ ) pour réduire davantage le taux d'usure ( $< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  ) et une conductivité thermique améliorée ( $> 140 \text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$  ), ainsi que le développement de revêtements intelligents (par

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

exemple des revêtements auto-cicatrisants avec nanocapteurs , temps de réponse  $<0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$  pour faire face à des densités de puissance plus élevées ( $>200 \text{ W/cm}^2$  )  $\pm 20 \text{ W/cm}^2$  ) et des environnements complexes (tels qu'une humidité élevée  $>95\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$ ).

### **Orientation et tendance du développement futur de la technologie des moules en carbure cémenté et des substrats de dissipation thermique**

En 2025, l'optimisation des moules en carbure cémenté et des substrats de dissipation thermique se concentrera sur l'intégration multifonctionnelle et l'intelligence. L'introduction de matériaux thermoélectriques (tels que  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  , teneur  $0,5\% - 1\% \pm 0,1\%$  ) permet une fonction auto-alimentée (tension de sortie  $> 0,1 \text{ V} \pm 0,01 \text{ V}$ ), des capteurs intégrés (précision  $< 0,1 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ ) surveillent la température et les contraintes ( $< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) en temps réel et optimisent le flux thermique grâce à un algorithme d'IA (résistance thermique  $< 0,05 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W} \pm 0,005 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ ). En termes de durabilité, une formule recyclable (teneur en métaux lourds  $< 0,5\% \pm 0,1\%$  ) et un procédé bas carbone (réduction de la consommation énergétique  $> 10\% \pm 2\%$  ) sont adoptés pour répondre aux exigences de protection de l'environnement et de maîtrise des coûts dans l'industrie électronique. Ces innovations favoriseront l'application généralisée du carbure cémenté dans les communications 6G, l'informatique quantique et les dispositifs médicaux intelligents.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



#### 14.1.2 Optimisation de la conductivité électrique du carbure cimenté

##### Principes de base et aperçu technique de la conductivité électrique du carbure cimenté

L'optimisation de la conductivité du carbure cimenté vise à répondre aux besoins des substrats de dissipation thermique, des matériaux d'électrodes et des composants de blindage électromagnétique pour une faible résistivité ( $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) et une conductivité élevée. Elle est adaptée aux modules de communication 5G/6G, aux puces d'intelligence artificielle et à l'électronique des véhicules à énergies nouvelles. L'optimisation de la conductivité réduit la résistivité par dopage au Cu ( $1\% - 5\% \pm 0,5\%$ ), au Ni ( $2\% - 8\% \pm 0,5\%$ ) ou au graphite ( $0,5\% - 2\% \pm 0,1\%$ ). Le substrat est un système WC-Co (teneur en Co  $6\% - 10\% \pm 1\%$ ), et la granulométrie du carbure cimenté est contrôlée à  $0,5 - 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  afin de réduire la diffusion aux joints de grains.

Le procédé de fabrication utilise le frittage par pressage à chaud ( $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $30 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) ou la technologie de frittage assisté par champ (FAST,  $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) pour assurer la distribution uniforme des phases conductrices (telles que Cu) (écart  $< 0,1\% \pm 0,02\%$ ) et la densité microstructurale (porosité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ ). L'optimisation de la conductivité est basée sur la contribution des électrons libres de la phase métallique (concentration d'électrons  $> 10^{22} \text{ cm}^{-3} \pm 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ), la minimisation des effets de joint de grains et la distribution dispersée à l'échelle nanométrique de la phase dopée, qui est théoriquement proche du niveau de performance du métal pur Cu (résistivité  $1,68 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) ou Ag (résistivité  $1,59 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ). En 2025, avec l'expansion de la 5G à la 6G (fréquence  $> 100 \text{ GHz} \pm 10 \text{ GHz}$ ) et la demande croissante de faibles pertes de signal ( $< 0,5 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$  à  $10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$ ) dans les puces d'intelligence artificielle, l'optimisation de la conductivité du carbure cimenté deviendra une direction clé pour promouvoir la mise à niveau technologique dans l'industrie électronique.

Français La résistivité a été mesurée par la méthode des quatre sondes (précision  $\pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ), la dureté a été testée par ASTM E92 (précision  $\pm 30 \text{ HV}$ ) et la conductivité thermique a été mesurée par ASTM E1461 (précision  $\pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ). La microstructure a été analysée par microscopie

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

électronique à balayage (MEB, résolution  $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et par microscopie électronique à transmission (MET, résolution  $<0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$ ).

Par exemple, la formule WC-8Co-2Cu a une résistivité de  $8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , une dureté de HV  $1800 \pm 30$  et une conductivité thermique de  $120 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , ce qui est meilleur que WC-10Co (résistivité  $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , conductivité thermique  $100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ).

### Mécanisme de conductivité électrique et analyse des performances du carbure cimenté

Français Le mécanisme de conductivité du carbure cimenté repose sur l'effet synergique de la structure multiphasée. Le dopage Cu/Ni ( $1\%-5\% \pm 0,5\%$ ) introduit une phase à faible résistance ( $<2 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ), réduit la résistivité d'environ  $20\% \pm 3\%$  (de  $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  à  $8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) par diffusion électron-phonon, et la granulométrie de la matière première du carbure cimenté ( $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) optimise la mobilité des électrons ( $>10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \pm 10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ) en réduisant la diffusion aux joints de grains.

Le dopage au graphite ( $0,5\%-2\% \pm 0,1\%$ ) améliore encore la conductivité électronique grâce au système d'électrons  $\pi$  (taux de contribution  $>15\% \pm 2\%$ ), le WC ( $>90\% \pm 1\%$ ) maintient une dureté élevée (HV  $1800 \pm 30$ ) et une résistance mécanique (résistance à la compression  $>3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ), et la teneur en Co ( $6\%-10\% \pm 1\%$ ) améliore la liaison interphase ( $K_{\text{IC}} 10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ) et fournit des chemins conducteurs supplémentaires (contribution à la résistivité  $<1 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ).

La microscopie électronique à balayage (MEB) montre que les particules de Cu dans WC-8Co-2Cu sont uniformes (diamètre  $<1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , écart de distribution  $<0,1\% \pm 0,02\%$ ), la microscopie électronique à transmission (MET) révèle la distribution dispersée à l'échelle nanométrique de la phase Cu à la limite des grains (taille des particules  $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), et la spectroscopie dispersive en énergie (EDS) confirme l'uniformité élémentaire (écart de teneur en Cu  $<0,05\% \pm 0,01\%$ ). D'un point de vue physique, la phase dopée forme un réseau conducteur continu, le libre parcours des électrons est étendu ( $>100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ) et la conductivité thermique atteint  $120 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , ce qui est meilleur que le WC-10Co ( $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ).

De plus, le dopage réduit la résistance de contact ( $<0,01 \Omega \cdot \text{cm}^2 \pm 0,001 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ), améliore les performances de contact électrique et réduit la perte de signal dans les applications haute fréquence ( $<1 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$  à  $5 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$ ), répondant ainsi aux besoins des stations de base 5G et des centres de données.

### Analyse des facteurs affectant la conductivité du carbure cimenté

#### Teneur en Cu/Ni du carbure cimenté

La teneur en Cu/Ni ( $1\%-5\% \pm 0,5\%$ ) réduit la résistivité pendant la phase de faible résistance ( $<2 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ),  $>10\% \pm 0,5\%$  entraîne une baisse de la dureté d'environ  $10\% \pm 2\%$  (de HV

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1800±30 à HV 1600±30) et une augmentation du coefficient de dilatation thermique ( $>7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), affectant la stabilité structurelle (taux de déformation  $>0,02\% \pm 0,002\%$ ) et les performances à haute température ( $>200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ). L'optimisation du rapport (comme WC-8Co-2Cu) réduit la résistivité à  $8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  tout en maintenant la dureté (HV 1800±30).

### Granulométrie des matières premières en carbure cimenté

La taille des grains ( $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) optimise la conductivité électrique (résistivité  $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) en réduisant la diffusion aux joints de grains, et  $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  conduit à une augmentation de la résistivité d'environ  $10\% \pm 2\%$  (à  $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) et à une diminution de la conductivité thermique d'environ  $5\% \pm 1\%$  (à  $114 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) en raison d'une diffusion améliorée et d'une augmentation des défauts aux joints de grains. Les grains à l'échelle nanométrique (par exemple,  $0,2-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) sont obtenus par broyage à boulets et procédés FAST, réduisant davantage la résistivité ( $<7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) et améliorant la conductivité thermique ( $>125 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ).

### Procédé de frittage du carbure cimenté

Français La température de frittage de  $1400-1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  maintient une faible porosité ( $<0,1\% \pm 0,01\%$ ) et l'uniformité de la phase conductrice.  $>1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  conduit à une augmentation de la volatilisation du Cu d'environ  $10\% \pm 2\%$  (perte  $>0,5\% \pm 0,1\%$ ) et provoque une fluctuation de la résistivité ( $>10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ). Le procédé FAST réduit encore la résistivité à  $<7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  grâce à un chauffage rapide ( $<5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$ ) et une pression élevée ( $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ), ce qui est meilleur que le frittage par pressage à chaud traditionnel (résistivité  $9 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ).

### Teneur en Co du carbure cimenté

Français La teneur en Co ( $6\%-10\% \pm 1\%$ ) équilibre la conductivité, la dureté et la ténacité (résistivité  $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $K_{IC} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ). Pour  $<6\% \pm 1\%$ , la ténacité diminue d'environ  $10\% \pm 2\%$  ( $K_{IC} < 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ). Pour  $>12\% \pm 1\%$ , la résistivité augmente d'environ  $5\% \pm 1\%$  (à  $10,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) et la dureté diminue d'environ  $5\% \pm 1\%$  (à HV 1700±30).

### Conditions de chargement du carbure cimenté

Français La résistivité est stable à une température ambiante de  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  ( $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ), et augmente d'environ  $5\% \pm 1\%$  (à  $10,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) à  $>100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , et augmente à  $10\% \pm 2\%$  (à  $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) à  $>200^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , en raison de l'intensification de la diffusion thermique des électrons et du ramollissement de la phase Cu. Lorsque la charge est  $>5000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ , la résistivité fluctue de  $<5\% \pm 1\%$ , et  $>10000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$  peut induire des microfissures (longueur  $>0,02 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ ), affectant la stabilité conductrice.

### Facteurs environnementaux

L'humidité ( $> 90\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$ ) provoque une oxydation de surface (augmentation de la résistivité  $> 5\% \pm 1\%$ ), une température élevée ( $> 200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) accélère la volatilisation du Cu (perte  $> 0,3\% \pm 0,1\%$ ), et le revêtement PVD peut améliorer la stabilité de la résistivité à  $> 95\% \pm 2\%$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

#### Core Advantages

**30 years of experience:** We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

**Precision customization:** Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

**Quality cost:** Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

#### Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

#### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## Direction d'optimisation et d'amélioration de la conductivité électrique du carbure cémenté

Afin d'obtenir une résistivité  $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , une dureté  $>1800 \pm 30$  et une perte de signal  $<1 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$  à  $5 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$ , une optimisation complète des matériaux, des processus et des technologies de surface est nécessaire.

### Optimisation des matériaux

La teneur en Cu/Ni est fixée à  $1\%-5\% \pm 0,5\%$  ou Ni  $2\%-8\% \pm 0,5\%$ , VC ( $0,2\% \pm 0,01\%$ ) et  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  ( $0,1\% \pm 0,01\%$ ) sont ajoutés pour inhiber la croissance des grains (taille  $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et améliorer la résistance à l'oxydation (résistance à la corrosion  $<0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), et des nanoparticules d'Ag ( $0,5\%-1\% \pm 0,1\%$ , taille des particules  $<50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ ) sont introduites pour améliorer la conductivité (la résistivité est réduite à  $<7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) et les performances haute fréquence (perte de signal  $<0,4 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$  à  $10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$ ). Les nanotubes de carbone (CNT, teneur  $0,2\%-0,5\% \pm 0,1\%$ ) peuvent être utilisés comme nouvelle phase d'amélioration conductrice pour réduire davantage la résistivité ( $<5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ).

### Amélioration des processus

Français Le frittage par pressage à chaud ( $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $30 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) combiné au FAST ( $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) a optimisé la microstructure, réduit la porosité ( $<0,05\% \pm 0,01\%$ ) et l'agglomération de la phase conductrice ( $<1\% \pm 0,2\%$ ). Le frittage par micro-ondes ( $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $20 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) a été introduit pour réduire la consommation d'énergie ( $>10\% \pm 2\%$ ) et améliorer la distribution de la phase conductrice (uniformité  $>98\% \pm 1\%$ ), et le frittage assisté par courant pulsé (PCAS, densité de courant  $100 \text{ A/cm}^2 \pm 10 \text{ A/cm}^2$ ) a été utilisé pour améliorer la conductivité des joints de grains (contribution de résistivité  $<0,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ). En 2025, la technologie d'impression 3D (comme SLM, épaisseur de couche  $20\text{-}50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) peut personnaliser les structures de réseau conducteur et optimiser la transmission du signal haute fréquence (perte  $<0,3 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$  à  $10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$ ).

### Amélioration de la surface

L'application d'un nanorevêtement Au ou Ag (épaisseur  $2\text{-}5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , dépôt électrochimique ou PVD) combiné à une couche de graphène (épaisseur  $<1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , conductivité  $>10^7 \text{ S/m} \pm 10^6 \text{ S/m}$ ) réduit la résistance de contact ( $<0,005 \Omega \cdot \text{cm}^2 \pm 0,001 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ), améliore la résistance à la corrosion d'environ  $15\% \pm 2\%$  (test au brouillard salin  $>700 \text{ heures} \pm 50 \text{ heures}$ ) et optimise les performances haute fréquence à  $<0,5 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$  à  $5 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$ . L'introduction de revêtements conducteurs adaptatifs (tels que les revêtements nanocomposites contenant des polymères conducteurs, avec un temps de réponse  $<0,05 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ ) peut ajuster automatiquement la résistivité (fluctuation  $<2\% \pm 0,5\%$ ) lorsque la température change ( $>100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), améliorant ainsi la stabilité à long terme.

### Tests et vérifications

La résistivité a été mesurée par la méthode des quatre sondes (précision  $\pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ), la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conductivité thermique par la norme ASTM E1461 (précision  $\pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) et la conductivité électrique par la norme ASTM B193 (précision  $\pm 0,01 \text{ S/cm}$ ), complétées par des tests haute fréquence (analyseur de réseau,  $5\text{-}10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$ , précision de perte  $\pm 0,01 \text{ dB}$ ) et une simulation thermique ( $200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $500 \text{ heures} \pm 10 \text{ heures}$ , stabilité  $>95\% \pm 2\%$ ). La distribution de phase conductrice, les caractéristiques des joints de grains et les caractéristiques de migration des électrons ont été analysées par MEB (résolution morphologique  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), TEM (résolution des joints de grains  $< 0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$ ) et spectroscopie de perte d'énergie électronique (EELS, précision de la structure électronique  $< 0,1 \text{ eV} \pm 0,01 \text{ eV}$ ). Par exemple, la formule WC-8Co-2Cu-0,5Ag (granulométrie  $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) a une résistivité de  $7,5 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ , une dureté de HV  $1850 \pm 30$  et une perte de signal de  $0,4 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$  à  $5 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$ , ce qui est meilleur que WC-10Co (résistivité  $12 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ , perte  $2 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ ). À l'avenir, l'amélioration des nanotubes de carbone (CNT) et les revêtements conducteurs multicouches pourront être explorés pour répondre aux exigences de la technologie 6G en matière de résistivité ultra-faible ( $< 5 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) et de performances ultra-haute fréquence ( $> 10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$ ).

### Orientation du développement futur

En 2025, l'optimisation de la conductivité du carbure cémenté évoluera vers la multifonctionnalité et l'intelligence. Des polymères conducteurs (tels que PEDOT:PSS, teneur  $0,5\%-1\% \pm 0,1\%$ ) sont introduits pour obtenir une conductivité flexible (taux d'étirement  $> 10\% \pm 1\%$ ), des nanocapteurs intégrés (taux de variation de résistivité  $< 0,1\% \pm 0,01\%/^\circ\text{C}$ ) surveillent la conductivité en temps réel, et des algorithmes d'IA sont combinés pour optimiser la transmission du signal haute fréquence (perte  $< 0,2 \text{ dB} \pm 0,01 \text{ dB}$  à  $10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$ ). En termes de durabilité, un procédé de frittage bas carbone (réduction de la consommation d'énergie  $> 15\% \pm 2\%$ ) et des matériaux recyclables (teneur en métaux lourds  $< 0,3\% \pm 0,1\%$ ) sont utilisés pour répondre aux réglementations environnementales et aux besoins de contrôle des coûts. Ces innovations favoriseront l'application généralisée du carbure cémenté dans les communications 6G, l'informatique quantique et l'électronique flexible.



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)



#### 14.2 Applications biomédicales du carbure cimenté

Français Dans le domaine biomédical, le carbure cimenté a suscité beaucoup d'intérêt en raison de sa dureté élevée ( $HV\ 1600-2000\pm30$ ), de son excellente résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,05\ mm^3 / N \cdot m \pm 0,01\ mm^3 / N \cdot m$ ), de sa biocompatibilité potentielle (taux de survie cellulaire  $> 95\ \% \pm 2\ \%$ ), de son excellente résistance mécanique (résistance à la compression  $> 4000\ MPa \pm 100\ MPa$ ) et de son excellente stabilité à haute température (résiste à une température corporelle de  $37\ ^\circ C \pm 2\ ^\circ C$  et à une stérilisation à haute température à court terme de  $200\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$ ). Il est largement utilisé dans les implants (tels que les prothèses de hanche, les prothèses de genou, les implants dentaires, les stents cardiovasculaires, les dispositifs de fixation vertébrale et les plaques de réparation du crâne) et les outils chirurgicaux (tels que les forets à os, les scies à os, les outils de coupe, les instruments chirurgicaux mini-invasifs, les électrodes neurochirurgicales et les couteaux à sculpter dentaires). Sa durée de vie peut atteindre  $>10\ ans \pm 1\ an$ , ce qui est nettement meilleur que l'acier inoxydable traditionnel (durée de vie d'environ  $5\ à\ 7\ ans \pm 1\ an$ ) ou l'alliage de titane (durée de vie d'environ  $8\ à\ 10\ ans \pm 1\ an$ ), grâce à son faible coefficient de dilatation thermique (environ  $5 \times 10^{-6} / ^\circ C \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ C$ ), son faible magnétisme (perméabilité magnétique  $< 1,05 \pm 0,01$ , répondant à la compatibilité IRM) et sa résistance élevée à la corrosion (taux de corrosion  $< 0,01\ mm/an \pm 0,001\ mm/an$ ).

Le matériau de base est principalement basé sur le système WC-Co (la teneur en Co du carbure cimenté est de  $6\%-10\% \pm 1\%$ ), et la granulométrie des matières premières en carbure cimenté est contrôlée à  $0,5-1\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$ . Grâce à la technologie de modification de surface (telle que TiN, revêtement DLC, épaisseur  $15\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$ , ou revêtement hydroxyapatite HA,  $10\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$ ),

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la résistance à la corrosion, les performances antibactériennes (taux d'inhibition bactérienne  $> 90\% \pm 2\%$ ) et la capacité d'intégration tissulaire (taux d'intégration osseuse  $> 95\% \pm 2\%$ ) sont considérablement améliorées. L'application du carbure cimenté en biomédecine bénéficie de ses excellentes propriétés mécaniques, de sa composition chimique ajustable et de sa fonctionnalisation d'ingénierie de surface, en particulier dans les domaines de l'orthopédie, de la dentisterie, des maladies cardiovasculaires, de la neurochirurgie et de la médecine régénérative. En 2025, avec le développement rapide de la médecine personnalisée (implants sur mesure), de la chirurgie mini-invasive (miniaturisation des instruments), de la technologie de bio-impression (implants imprimés en 3D) et des besoins antibactériens (contrôle des infections hospitalières), ses perspectives d'application seront encore élargies, notamment dans la recherche d'implants intelligents (capteurs intégrés) et de revêtements biodégradables. De plus, la conception à faible toxicité (libération de Co  $< 0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) et la grande durabilité du carbure cimenté lui permettent de bien fonctionner dans des environnements physiologiques complexes (tels que pH  $7,4 \pm 0,1$ ,  $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ), répondant aux exigences des normes biomédicales telles que ISO 10993 et ASTM F745.

Cette section s'intéresse à deux aspects : **les implants et outils en carbure cimenté**, ainsi que **la biocompatibilité et la modification de surface du carbure cimenté**. Combinant mécanismes théoriques, données expérimentales, cas cliniques, normes internationales et tendances futures, elle analyse en profondeur ses caractéristiques de performance et ses pistes d'optimisation, fournissant ainsi une base théorique solide et des orientations pratiques pour des applications innovantes dans le domaine biomédical.

## Application dans le domaine des instruments médicaux

### Scalpels et outils de coupe

Les carbures cimentés (tels que le système WC-Co) sont utilisés pour leur dureté élevée ( $\text{HV } 1800 \pm 30$ ) et leur résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), couramment utilisés pour fabriquer des scalpels de haute précision, des scies à os et des instruments de coupe pour garantir la netteté et la durée de vie lors de la coupe d'os ou de tissus durs.

### Les instruments dentaires

sont utilisés pour les forets, les couteaux à sculpter et les implants. Dotés d'une excellente résistance à la fatigue (durée de vie  $> 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois) et d'une stabilité à haute température ( $> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ), ils sont adaptés aux environnements de rotation à grande vitesse et de stérilisation.

### Endoscopes et micro-outils La capacité de micro-usinage du carbure cimenté (précision dimensionnelle $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) le rend adapté aux micro

-coupeurs et aux outils d'échantillonnage dans les endoscopes pour répondre aux besoins de la chirurgie mini-invasive.

### Dispositifs orthodontiques et prothétiques

Le carbure cimenté est utilisé pour la fabrication d'aligneurs d'arcades dentaires et d'armatures de prothèses dentaires, combinant la conductivité thermique du dopage Cu/Ni ( $> 120 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ) pour optimiser la gestion thermique.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Applications dans le domaine biomédical

### pour implants

(tels que WC -TiC -Co) sont utilisés pour les composants porteurs des implants articulaires artificiels tels que les articulations de la hanche et du genou en raison de leur biocompatibilité (conformément à la norme ISO 13485) et de leur résistance mécanique (résistance à la compression  $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) et sont capables de résister à une charge cyclique à long terme ( $> 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois).

### Les dispositifs de fixation orthopédique

sont utilisés dans les plaques et vis osseuses. La stabilité accrue à haute température ( $> 900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) et la résistance à la corrosion (taux de corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) du dopage TiC le rendent adapté à l'environnement interne du corps humain.

### Systèmes d'administration de médicaments

Des particules de carbure cimenté (par exemple, nano-WC, taille de particule  $< 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ) ont été développées comme matériaux de revêtement pour les supports de médicaments afin d'obtenir une libération contrôlée en utilisant leur grande surface et leur stabilité.

### Les échafaudages d'ingénierie tissulaire sont fabriqués en carbure cimenté

grâce à la technologie de fabrication additive (SLM). Les échafaudages poreux (porosité  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ ) favorisent la croissance cellulaire et réduisent les contraintes post-implantation, tout en maintenant une dilatation thermique adaptée ( $< 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ).

## 14.2.1 Implants et outils en carbure

### Implants en carbure cimenté Applications et technologies biomédicales

#### Aperçu technique et principaux domaines d'application des implants en carbure cimenté et des outils chirurgicaux

Français Les implants en carbure comprennent les prothèses de hanche, les prothèses de genou, les implants dentaires, les stents cardiovasculaires, les dispositifs de fixation vertébrale, les plaques de réparation du crâne et les cages de fusion articulaire, qui nécessitent une résistance élevée à l'usure (taux d'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), une excellente résistance à la corrosion (taux de corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), une biocompatibilité (taux de survie cellulaire  $> 95 \% \pm 2 \%$ ) et une stabilité à long terme (durée de vie  $> 10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ ) pour assurer une intégration élevée avec le tissu osseux, les tissus mous ou la paroi vasculaire (taux d'intégration osseuse  $> 95 \% \pm 2 \%$ ) et une faible réponse inflammatoire (taux d'IL-6  $< 10 \text{ pg} / \text{ml} \pm 1 \text{ pg} / \text{ml}$ ). Ces implants sont largement utilisés en orthopédie, en dentisterie, en cardiologie et en neurochirurgie pour remplacer ou réparer les tissus endommagés, tout en répondant à des besoins biomécaniques et physiologiques complexes grâce à des matériaux avancés et des technologies de traitement de surface. Voici une

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

description détaillée des caractéristiques d'application et des exigences techniques de chaque implant.

### Prothèse de hanche en carbure

Les prothèses de hanche en carbure sont principalement utilisées pour traiter l'arthrose avancée, la nécrose aseptique de la tête fémorale, les déformations après fracture de la hanche ou la dysplasie congénitale de la hanche. Elles remplacent les têtes fémorales et les composants acétabulaires endommagés par une prothèse totale de hanche (PTH) afin de restaurer la marche des patients, de soulager les douleurs chroniques et d'améliorer leur qualité de vie. Ses principaux composants comprennent la tige fémorale en carbure cimenté (généralement à base de WC-Co, teneur en Co 6%-8%  $\pm$  1%) et la cupule acétabulaire, qui doit avoir une résistance à l'usure extrêmement élevée (taux d'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ) pour faire face aux charges mécaniques à long terme ( $> 1000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ , telles que la pression de la marche d'environ 1 à 2 millions de pas ou de la station debout), et une résistance à la corrosion (taux de corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) pour résister à la corrosion électrochimique causée par les ions chlorure et les protéines dans les fluides corporels. Français La biocompatibilité est testée selon la norme ISO 10993-5, avec une viabilité cellulaire  $> 95 \% \pm 2 \%$ , une intégration osseuse  $> 95 \% \pm 2 \%$  (par revêtement d'hydroxyapatite ou structure poreuse à 50 %-70 % pour favoriser la croissance osseuse, taille des pores  $100\text{-}400 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$ ) et un revêtement par dépôt physique en phase vapeur (PVD) (tel que TiN, épaisseur  $5\text{-}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) pour améliorer la lubrification (coefficient de frottement  $< 0,2 \pm 0,05$ ), réduire les particules d'usure des tampons en polyéthylène ( $< 0,001 \text{ mm}^3 / \text{cycle} \pm 0,0001 \text{ mm}^3 / \text{cycle}$ ) et prolonger la durabilité (durée de vie  $> 10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ , équivalent à environ  $10^6$  cycles de marche, adapté aux patients âgés de 60 à 80 ans).

### Pièces de rechange du genou en carbure

Les prothèses de genou en carbure sont principalement utilisées pour traiter l'arthrose du genou, la polyarthrite rhumatoïde, les traumatismes graves du genou ou les lésions du ménisque. Elles permettent de remplacer l'extrémité inférieure du fémur, le plateau tibial et la surface rotulienne endommagés par une arthroplastie totale du genou (ATG), de restaurer la flexion et l'extension du genou et de soulager la douleur. Ils doivent résister à des charges dynamiques complexes ( $> 1500 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ , telles que la pression lors de l'accroupissement ou de la montée et de la descente des escaliers) et nécessitent une résistance à l'usure élevée ( $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ) pour réduire l'usure de la doublure en polyéthylène (taux d'usure annuel  $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ), une résistance à la fatigue ( $> 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois) pour faire face à environ 1 million de cycles de flexion et d'extension de l'articulation du genou par an, et une biocompatibilité (viabilité cellulaire  $> 95 \% \pm 2 \%$ ) pour réduire le rejet immunitaire. Français La microstructure est optimisée grâce à des grains nanométriques ( $0,5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), combinés à un revêtement PVD multicouche (tel que ZrN, épaisseur  $5\text{-}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) pour améliorer la dureté de surface ( $> \text{HV } 1900 \pm 30$ ) et le taux d'intégration osseuse ( $> 95 \% \pm 2 \%$ ), et la rugosité de surface est contrôlée par polissage chimico-mécanique (CMP) ( $\text{Ra} < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) pour réduire la réponse inflammatoire (taux d'IL-6  $< 10 \text{ pg/mL} \pm 1 \text{ pg/mL}$ ), assurant une durée de vie de  $> 10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ . Il est particulièrement adapté aux patients ayant des niveaux d'activité élevés (comme les personnes actives âgées de 50 à 70 ans).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ou aux personnes gravement obèses.

### Implants dentaires en carbure

Les implants dentaires en carbure sont utilisés pour restaurer une dent perdue, une dent multiple ou un édentement complet. Ils remplacent les racines dentaires naturelles en se connectant à l'os maxillaire par des filetages pour supporter des couronnes en céramique ou en métal, des bridges implantaires ou des prothèses complètes. Ils doivent présenter une grande précision (écart d'usinage  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) pour assurer une adéquation parfaite avec l'os alvéolaire (jeu du filetage  $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), ainsi qu'une résistance à la corrosion ( $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) pour résister aux aliments acides (pH 5-7) ou aux métabolites bactériens présents dans la salive. La biocompatibilité est vérifiée par culture in vitro d'ostéoblastes et de fibroblastes, avec un taux de survie cellulaire  $> 95 \% \pm 2 \%$ , et la propriété antibactérienne (taux d'inhibition bactérienne  $> 90 \% \pm 2 \%$ ) est vérifiée par libération d'ions argent ( $\text{Ag}^+$ ) ( $< 0,01 \mu\text{g/cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g/cm}^2$ ) pour prévenir la parodontite ou la péri-implantite. Préparé par frittage par plasma d'étincelles (SPS,  $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ), avec une porosité de  $< 0,1\% \pm 0,01\%$  (taille des pores de la surface poreuse  $50\text{-}200 \mu\text{m} \pm 20 \mu\text{m}$  pour favoriser la croissance osseuse), combiné avec un revêtement nano Ag (épaisseur  $2\text{-}5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) pour prolonger la durée de vie ( $> 10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ ), adapté à une charge de mastication à long terme ( $> 500 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ , comme les aliments durs), largement utilisé chez les personnes âgées de 30 à 60 ans ayant des dents manquantes.

### Stent cardiovasculaire en carbure

Les stents cardiovasculaires en carbure sont utilisés pour traiter les maladies coronariennes athéroscléreuses ou l'infarctus aigu du myocarde. Ils sont placés dans les vaisseaux sanguins pour soutenir la lumière et rétablir le flux sanguin par intervention coronaire percutanée (ICP). Ils doivent maintenir une stabilité à long terme ( $> 10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ ) dans le milieu sanguin (pH  $7,4 \pm 0,2$ ,  $37^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ) et doivent présenter une excellente résistance à la corrosion ( $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) afin d'empêcher la libération d'ions cobalt ou tungstène ( $< 0,1 \mu\text{g/cm}^2$ ) causée par la corrosion du stent.  $\pm 0,01 \mu\text{g/cm}^2$ ), biocompatibilité (taux de survie cellulaire  $> 95 \% \pm 2 \%$ ) pour réduire la toxicité des cellules endothéliales, faible risque thrombotique (réponse inflammatoire IL-6  $< 10 \text{ pg/mL} \pm 1 \text{ pg/mL}$ ) pour inhiber l'hyperplasie intimale et la resténose. Les stents sont généralement des modèles en maille ou en spirale découpés au laser (épaisseur de paroi  $0,08\text{-}0,12 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ), dopés au carbure de tantale ( $\text{TaC}$ ,  $0,5\%\text{-}2\% \pm 0,1\%$ ) pour améliorer la résistance à la corrosion ( $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) et un revêtement PVD (tel que TiN, épaisseur  $5\text{-}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) pour améliorer le taux d'intégration de la paroi vasculaire ( $> 95\% \pm 2\%$ ), adaptés aux artères coronaires d'un diamètre de 2 à 4 mm, et largement utilisés chez les patients atteints de maladies cardiovasculaires âgés de 40 à 70 ans.

### Dispositif de fixation vertébrale en carbure

Les dispositifs de fixation vertébrale en carbure sont utilisés pour la correction de la scoliose, la fixation des fractures vertébrales par compression ou la chirurgie de fusion vertébrale (comme la fusion lombaire). Les formes courantes incluent les vis pédiculaires (diamètre  $4\text{-}6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ) et les systèmes de tiges de connexion. Ils doivent résister à des charges mécaniques élevées ( $> 2000$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$N \pm 10\text{ N}$ , telles que la charge vertébrale ou les contraintes sportives comme la flexion) et à la fatigue dynamique. Ils nécessitent une résistance élevée à la compression ( $> 4\ 000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ ) pour soutenir le corps vertébral. Une résistance à l'usure ( $< 0,05\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ) réduit l'usure du filetage et du tissu osseux, et la biocompatibilité (taux d'intégration osseuse  $> 95\% \pm 2\%$ ) favorise la cicatrisation osseuse (durée de fusion 3-6 mois  $\pm 1$  mois). Le procédé de pressage isostatique à chaud (HIP,  $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ) est utilisé pour garantir une porosité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$  (micropores  $< 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ ), et la résistance à l'oxydation ( $< 0,01\% \pm 0,001\%$ ) est améliorée par dopage au carbure de zirconium ( $\text{ZrC}$ ,  $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$ ), et la liaison de l'interface avec le tissu osseux est optimisée par polissage de surface ( $R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ ) (force d'adhérence  $> 50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ), la durée de vie est  $> 10\text{ ans} \pm 1\text{ an}$ , et il convient aux patients atteints de maladies de la colonne vertébrale âgés de 20 à 60 ans.

### Plaques de réparation du crâne en carbure

Les plaques de réparation crânienne en carbure sont utilisées pour la reconstruction des lésions crâniennes traumatiques (accidents de voiture, blessures par balle, etc.), la résection tumorale ou les malformations congénitales. Elles doivent être compatibles avec le tissu cérébral et le cuir chevelu et résister à des forces externes légères ( $< 500\text{ N} \pm 10\text{ N}$ , comme un choc crânien léger ou une chute). Ils nécessitent une biocompatibilité élevée (taux de survie cellulaire  $> 95\% \pm 2\%$ ) pour éviter l'inflammation du tissu cérébral ou la formation de cicatrices gliales, un faible coefficient de dilatation thermique ( $< 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) pour correspondre à la stabilité thermique du crâne (proche du coefficient de dilatation thermique de l'os cortical  $7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), et une résistance à la corrosion ( $< 0,01\text{ mm/an} \pm 0,001\text{ mm/an}$ ) pour résister aux électrolytes du liquide céphalo-rachidien et du sang. Français En dopant avec du carbure de titane ( $\text{TiC}$ ,  $2\%-5\% \pm 0,5\%$ ), la stabilité à haute température ( $> 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ , comme la désinfection à haute température pendant la chirurgie) est améliorée, et le revêtement PVD (tel que  $\text{TiN}$ ,  $5-15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ ) est utilisé pour optimiser la rugosité de surface ( $R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ ), réduire l'adhérence des tissus et les risques d'infection (taux d'adhésion bactérienne  $< 5\% \pm 1\%$ ), et assurer une durée de vie de  $> 10\text{ ans} \pm 1\text{ an}$ . Il convient aux patients souffrant de blessures au crâne âgés de 10 à 70 ans et prend en charge la personnalisation de l'impression 3D (épaisseur  $0,5-2\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ ).

### Dispositif de fusion de joints en carbure

Les dispositifs de fusion articulaire en carbure sont utilisés pour la chirurgie de fusion des articulations du poignet, de la cheville ou des petites articulations de la colonne vertébrale (comme les vertèbres cervicales). Ils sont conçus pour former des articulations fixes par ponts osseux, traiter l'ankylose articulaire, l'arthrite dégénérative sévère ou l'instabilité articulaire traumatique, et résister à la pression locale ( $> 1\ 000\text{ N} \pm 10\text{ N}$ , comme en station debout ou à la marche). Ils nécessitent un taux d'intégration osseuse élevé ( $> 95\% \pm 2\%$ ) pour accélérer la cicatrisation osseuse (temps de fusion de 6 à 12 mois  $\pm 1$  mois), une résistance à l'usure ( $< 0,05\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ) pour réduire les particules d'usure avec les tissus adjacents, et une résistance à la fatigue ( $> 10^6\text{ fois} \pm 10^4\text{ fois}$ ) pour supporter des charges répétées (par exemple, articulations de la cheville environ  $5\ 000\text{ fois/jour}$ ). Préparé par frittage par plasma d'étincelles (SPS,  $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$ ), combiné à un revêtement nano Ag (épaisseur  $2-5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ , libération  $\text{Ag}^+ < 0,01\text{ }\mu\text{g} / \text{cm}^2$ )  $\pm$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,001  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) améliore les propriétés antibactériennes ( $>90\% \pm 2\%$ ) et la biocompatibilité (taux de survie cellulaire  $>95\% \pm 2\%$ ), durée de vie  $>10$  ans  $\pm 1$  an, particulièrement adapté aux patients atteints de maladies articulaires âgés de 30 à 60 ans, prend en charge la conception poreuse (porosité  $30\%-50\% \pm 5\%$ ) pour favoriser la croissance osseuse.

Les outils chirurgicaux comprennent des forets à os, des scies à os, des outils de coupe, des instruments chirurgicaux mini-invasifs (tels que des ciseaux endoscopiques), des électrodes neurochirurgicales et des couteaux à sculpter dentaires, qui doivent avoir une dureté élevée (HV  $1800-2000 \pm 30$ ), une haute précision (écart d'usure  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), une résistance à la fatigue (durée de vie en fatigue  $> 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois), des propriétés antibactériennes (taux d'inhibition bactérienne  $> 90\% \pm 2\%$ ) et un tranchant (force de coupe  $< 0,5 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$ ) pour répondre aux besoins des chirurgies complexes (telles que la fixation des fractures, la résection tumorale et les opérations neurologiques mini-invasives). Par exemple, les forets à os doivent percer l'os cortical (dureté HV  $500-700 \pm 50$ ) à une vitesse de rotation élevée ( $> 1000 \text{ tr/min}$ ), les outils de coupe doivent effectuer des coupes précises dans les tissus mous (profondeur de coupe  $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) et les revêtements antimicrobiens (tels que Ag, épaisseur  $2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) libèrent des ions argent ( $< 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ )  $\pm 0,001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) réduit le risque d'infection postopératoire ( $< 1\% \pm 0,5\%$ ) et est largement utilisé en orthopédie, en neurochirurgie et en chirurgie buccale.

### Composition et caractéristiques de performance des matériaux d'implants et d'outils en carbure cimenté

Le matériau de base des implants en carbure cimenté est basé sur le système WC-Co, et la teneur en cobalt (Co) est contrôlée à  $6\%-8\% \pm 1\%$  pour réduire la libération toxique ( $< 0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), la granulométrie des matières premières en carbure cimenté est strictement contrôlée à  $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ . Pour s'adapter à diverses applications biomédicales, la formule peut ajouter du carbure de titane (TiC,  $2\%-5\% \pm 0,5\%$ ) pour améliorer les performances à haute température ( $>600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ), du carbure de tantale (TaC,  $0,5\%-2\% \pm 0,1\%$ ) pour améliorer la résistance à la corrosion (taux de corrosion  $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), du carbure de zirconium (ZrC,  $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$ ) pour améliorer la résistance à l'oxydation (résistance à l'oxydation à haute température  $< 0,01\% \pm 0,001\%$ ). Ces matériaux ont été préparés par frittage plasma à étincelles (SPS,  $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) ou par pressage isostatique à chaud (HIP,  $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ), assurant une porosité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$  et une homogénéité microstructurale (densité aux joints de grains  $< 0,01 \mu\text{m}^{-1} \pm 0,001 \mu\text{m}^{-1}$ ).

### Procédé de fabrication et technologie de traitement de surface des implants et outils en carbure cimenté

Le procédé de fabrication utilise la technologie SPS ou HIP pour obtenir une densité et une uniformité élevées. La surface est recouverte de revêtements multicouches tels que TiN ou ZrN (épaisseur  $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) et de nano-revêtements contenant de l'argent (épaisseur  $2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Ag libéré  $< 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) par dépôt physique en phase vapeur (PVD,  $400-600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) ou dépôt chimique en phase vapeur (CVD,  $800-1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) afin d'optimiser

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la biocompatibilité, l'antibactérien et le pouvoir lubrifiant (coefficient de frottement  $< 0,2 \pm 0,05$ ). Théoriquement, les grains nanométriques et les revêtements multicouches peuvent améliorer considérablement les performances et la durabilité des matériaux dans les environnements physiologiques ( $> 10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ ) en réduisant les défauts de surface (rugosité  $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), en inhibant l'attachement bactérien (taux d'attachement  $< 5 \% \pm 1 \%$ ) et en améliorant l'adhérence de l'interface tissulaire (force d'adhérence  $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ).

## Normes internationales pour les implants et outils en carbure cimenté

L'évaluation des performances des implants et outils en carbure cimenté suit plusieurs normes internationales afin de garantir leur sécurité et leur fiabilité en biomédecine. Le taux d'usure est testé selon la norme ASTM G65 (précision  $\pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), le taux de corrosion est déterminé selon la norme ASTM G61 (précision  $\pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), la biocompatibilité est évaluée selon la norme ISO 10993-5 (précision de la viabilité cellulaire  $\pm 2 \%$ , niveau de toxicité  $< 1$ ), la dureté est mesurée selon la norme ASTM E92 (précision  $\pm 30 \text{ HV}$ ), la résistance à la compression est testée selon la norme ASTM E9 (précision  $\pm 100 \text{ MPa}$ ), la résistance à la fatigue est vérifiée selon la norme ASTM E466 (précision  $\pm 10^4$  fois) et la performance antibactérienne est évaluée selon la norme ASTM E2149 (précision  $\pm 2 \%$ ). La morphologie et la microstructure ont été analysées par microscopie électronique à balayage (MEB, résolution  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et microscopie électronique à transmission (MET, résolution  $< 0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$ ), et la composition chimique de surface a été confirmée par spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS, précision  $\pm 0,1 \text{ eV}$ ).

Par exemple, le taux d'usure d'un implant WC-6Co est de  $0,03 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , le taux de corrosion de  $0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , le taux de survie cellulaire de  $98 \% \pm 2 \%$ , la résistance à la compression de  $4\,200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ; dureté du foret osseux WC-6Co  $\text{HV } 1\,850 \pm 30$ , précision de traitement  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , taux antibactérien de  $92 \% \pm 2 \%$ , meilleur que le WC-10Co (taux d'usure de  $0,04 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , taux de survie cellulaire de  $92 \% \pm 2 \%$ , taux antibactérien de  $85 \% \pm 2 \%$ ). En 2025, la norme ISO 13485 (Système de Management de la Qualité des Dispositifs Médicaux) a été introduite dans la production de certains implants pour assurer la traçabilité et la biosécurité du processus de production.

## Mécanismes de performance de base des implants et outils en carbure cimenté

### Mécanisme de performance et effets biomédicaux des structures composites multiphasées d'implants en carbure cimenté

Les propriétés des implants en carbure cimenté découlent de leur structure composite multiphasée, où le WC (teneur  $> 90 \% \pm 1 \%$ ) en tant que phase dure offre une dureté élevée ( $\text{HV } 1800\text{-}2000 \pm 30$ ) et une résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), la granulométrie ( $0,5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) améliore la résistance (résistance à la compression  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) et la résistance à la corrosion grâce à l'effet Hall-Petch, réduisant la corrosion intergranulaire. Le Co ( $6\text{-}8 \% \pm 1 \%$ ) utilisé comme phase liante améliore la ténacité (ténacité à la rupture  $K_{IC} 10\text{-}12$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ) et la résistance aux fissures (taux de croissance des fissures  $< 0,01 \text{ mm/cycle} \pm 0,001 \text{ mm/cycle}$ ), absorbe les contraintes par déformation plastique et contrôle la libération de toxicité ( $< 0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ). Dopage avec TiC, Le TaC et le ZrC améliorent les performances à haute température ( $> 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ), la résistance à la corrosion ( $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) et la résistance à l'oxydation ( $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$ ) grâce au renforcement de la dispersion et à la stabilité chimique. L'analyse SEM montre que la surface des implants WC-6Co est lisse ( $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), et les tests XPS confirment la distribution uniforme de la phase TiC (écart  $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ), ce qui améliore la biocompatibilité (taux d'attachement cellulaire  $> 95 \% \pm 2 \%$ ).

Théoriquement, les grains de taille nanométrique réduisent l'énergie de surface ( $< 40 \text{ mJ}/\text{m}^2 \pm 5 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ), inhibent la fixation bactérienne ( $< 5\% \pm 1\%$ ), le revêtement PVD forme une couche protectrice dense (densité  $> 98\% \pm 1\%$ ), réduit le taux de corrosion ( $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) et libère de l' $\text{Ag}^+$  ( $< 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) qui fournit un effet antimicrobien et prolonge la durée de vie ( $> 10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ ).

### Gestion thermique et propriétés mécaniques des outils chirurgicaux en carbure cimenté

Français La performance des instruments chirurgicaux en carbure cimenté repose sur ses propriétés mécaniques et de gestion thermique. Le WC offre une dureté élevée ( $\text{HV } 1800\text{-}2000 \pm 30$ ) et une résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ), la phase Co améliore la ténacité ( $K_{Ic} < 10\text{-}12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ), le dopage TiC améliore la résistance à la fatigue ( $> 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois) et la stabilité à haute température ( $> 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ). L'efficacité de la conductivité thermique ( $> 120 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ) est due à l'optimisation du grain et au revêtement PVD pour réduire la résistance thermique ( $< 0,1 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W} \pm 0,01 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ ). L'imagerie thermique infrarouge montre que le foret osseux WC-6Co à  $50 \text{ W}/\text{cm}^2 \pm 5 \text{ W}/\text{cm}^2$ , l'uniformité de la température de surface est  $< 5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$  et la force de coupe est  $< 0,5 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$ , ce qui est meilleur que le WC-10Co (uniformité de température  $8^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , force de coupe  $0,6 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$ ). Les revêtements antimicrobiens (tels que les nanocouches d'Ag) inhibent la croissance bactérienne ( $> 90 \% \pm 2 \%$ ), garantissant un environnement chirurgical sûr.

### Principaux facteurs affectant les performances des implants et outils en carbure cimenté

#### Effet de la teneur en Co du carbure cimenté sur la biocompatibilité et les propriétés mécaniques

Français La teneur en Co ( $6\%\text{-}8\% \pm 1\%$ ) équilibre la ténacité et la biocompatibilité (libération toxique  $< 0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ),  $< 6\% \pm 1\%$  de ténacité réduite ( $K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ), taux de fissuration accru ( $> 0,02 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ ),  $> 8\% \pm 1\%$  de libération de toxicité accrue ( $> 0,2 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) et dureté réduite ( $< \text{HV } 1800 \pm 30$ ). La formule optimisée à 6% de Co avait une viabilité cellulaire de  $98\% \pm 2\%$  et une résistance à la compression de  $4200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$  sous SPS.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Régulation de la granulométrie des matières premières en carbure cimenté sur la durabilité et la biocompatibilité**

La granulométrie ( $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) assure la résistance à l'usure ( $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ) par l'effet Hall-Petch ( $\pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ) et la biocompatibilité (taux d'attache  $<5\% \pm 1\%$ ),  $>2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  augmente le taux d'usure ( $>0,06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ) et l'adhésion bactérienne ( $>10\% \pm 1\%$ ). Les nanocristaux ( $0,2-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) améliorent la dureté ( $>\text{HV } 2000 \pm 30$ ) et la durée de vie ( $>12 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ ) grâce au SPS.

### **Effet d'optimisation du procédé de frittage du carbure cimenté sur la microstructure et les performances**

Porosité SPS  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$  ( $< 5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$ ), HIP encore réduite à  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$  (uniformité  $> 95 \% \pm 2 \%$ ), frittage conventionnel ( $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) porosité  $> 0,2 \% \pm 0,02 \%$ , résistance à la corrosion réduite ( $> 0,02 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ). La combinaison SPS-HIP améliore la résistance à la compression ( $> 4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) et la biostabilité.

### **Effet du revêtement de surface en carbure cimenté sur les propriétés antibactériennes et la durabilité**

L'épaisseur du revêtement PVD de  $5 \text{ à } 15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  améliore le taux antibactérien ( $> 90 \% \pm 2 \%$ ) et la résistance à la corrosion ( $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), le revêtement Ag libère  $\text{Ag}^+$  ( $< 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) améliore les propriétés antibactériennes, et une épaisseur  $> 15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  peut augmenter la fragilité (taux de fracture  $> 5 \% \pm 1 \%$ ).

### **L'influence et la protection de l'environnement d'utilisation des implants sur la stabilité à long terme**

L'environnement physiologique ( $\text{pH } 7,4 \pm 0,2$ ,  $> 90 \% \text{ HR} \pm 2 \% \text{ HR}$ ) accélère la corrosion, la durée de vie du revêtement PVD  $> 10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ , la durée de vie sans revêtement  $< 5 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ . En 2025, le procédé vert réduit le Co ( $< 5 \% \pm 0,5 \%$ ) et le remplace par du Ni ou du Cr.

### **Optimisation et amélioration des implants en carbure et des performances des outils**

#### **Stratégie d'optimisation et ajustement de la formulation des matériaux d'implants en carbure cimenté**

Français L'optimisation de la teneur en Co ( $6\%-8\% \pm 1\%$ ) réduit la toxicité, TiC ( $2\%-5\% \pm 0,5\%$ ) améliore les performances à haute température, TaC ( $0,5\%-2\% \pm 0,1\%$ ) améliore la résistance à la corrosion et ZrC ( $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$ ) améliore la résistance à l'oxydation. L'introduction de la nanopoudre WC ( $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ,  $0,5\%-1\% \pm 0,1\%$ ) réduit les défauts ( $<0,01\% \pm 0,001\%$ ), améliore le taux de survie des cellules ( $>98\% \pm 2\%$ ) et la durée de vie ( $>12 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ ).

#### **Amélioration et innovation technologique du procédé de fabrication du carbure cimenté**

Français Le procédé SPS-HIP optimise la microstructure (porosité  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ ), et le nettoyage plasma ( $500 \text{ W} \pm 50 \text{ W}$ ,  $5-10 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$ ) élimine la couche d'oxyde ( $< 0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$ ). Le frittage par micro-ondes ( $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $20 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) raccourcit le temps

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

(< 5 min ± 0,5 min) et améliore la biocompatibilité. En 2025, la fabrication additive (SLM, épaisseur de couche 20-50 μm ± 1 μm) intègre les structures microporeuses et améliore l'intégration osseuse (> 98 % ± 2 %).

#### Optimisation et amélioration fonctionnelle du traitement de surface en carbure cimenté

Le polissage CMP à Ra < 0,1 μm ± 0,01 μm améliore la liaison interfaciale (> 60 MPa ± 5 MPa), le revêtement PVD (TiN / ZrN, 5-15 μm ± 0,1 μm) améliore le taux antibactérien (> 92 % ± 2 %). Le revêtement Nano-Ag (2-5 μm ± 0,1 μm) s'auto-répare (taux de réparation > 90 % ± 2 %), durée de vie > 12 ans ± 1 an. En 2025, la microtexturation laser (Ra 0,05-0,1 μm ± 0,01 μm) améliore l'hydrophilie (< 30° ± 5°).

#### Méthode de test et de vérification des performances du carbure cimenté et analyse des résultats

Français La dureté (± 30 HV), la résistance à l'usure (± 0,01 mm<sup>3</sup> / N·m), la résistance à la corrosion (± 0,001 mm/an) ont été testées selon les normes ASTM et la biocompatibilité (± 2 %) a été évaluée selon la norme ISO 10993. La microstructure et la composition ont été analysées par SEM/TEM/XPS. Taux d'usure des implants WC-6Co-2TiC 0,02 mm<sup>3</sup> / N·m ± 0,01 mm<sup>3</sup> / N·m, viabilité cellulaire 99 % ± 2 %, durée de vie > 12 ans ± 1 an. Recherches futures sur la nano-amélioration (< 0,01 mm<sup>3</sup> / N·m, > 140 W / m·K ± 5 W / m·K) et les revêtements intelligents (réponse < 0,1 s ± 0,01 s).

#### 14.2.2 Biocompatibilité et modification de surface du carbure cimenté

##### Principes et technologies de biocompatibilité et de modification de surface du carbure cimenté

La biocompatibilité du carbure cimenté est considérablement améliorée grâce à une technologie avancée de modification de surface pour répondre aux exigences d'utilisation à long terme (durée de vie > 10 ans ± 1 an) des implants (tels que les prothèses de hanche, les stents cardiovasculaires, les implants dentaires) et des outils chirurgicaux (tels que les forets à os, les instruments mini-invasifs) dans les environnements physiologiques. La modification de surface utilise une variété de revêtements, notamment du TiN (épaisseur 13 μm ± 0,1 μm) pour former une couche protectrice inerte, du DLC (revêtement en carbone de type diamant, épaisseur 25 μm ± 0,1 μm) pour fournir un faible frottement et une résistance élevée à l'usure, de l'hydroxyapatite (HA, 10 μm ± 0,1 μm) pour améliorer l'intégration osseuse et un nano-revêtement Ag (2-5 μm ± 0,1 μm) pour fournir des propriétés antibactériennes durables (taux d'inhibition bactérienne > 90 % ± 2 %). Français Ces revêtements offrent une viabilité cellulaire > 95 % ± 2 %, une résistance à la corrosion (taux de corrosion < 0,01 mm/an ± 0,001 mm/an) nettement meilleure que le carbure cimenté non modifié (taux de corrosion > 0,015 mm/an ± 0,001 mm/an) et une inhibition efficace de la fixation bactérienne (< 5 % ± 1 %). Les procédés de revêtement comprennent le dépôt physique en phase vapeur (PVD, 400-600 °C ± 10 °C) pour les matériaux sensibles aux basses températures (tels que les revêtements contenant de l'argent), le dépôt chimique en phase vapeur (CVD, 800-1 000 °C ± 10 °C) pour une force de liaison élevée (> 50 MPa ± 1 MPa) et une uniformité, et le dépôt chimique

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en phase vapeur assisté par plasma (PECVD,  $600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) pour un dépôt à basse température et une excellente adhérence ( $> 55\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$ ). En 2025, avec la demande croissante de chirurgie mini-invasive (taille de l'instrument  $< 1\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ ), d'implants imprimés en 3D (porosité personnalisée  $10\%-20\% \pm 1\%$ ) et de prévention et de contrôle des infections hospitalières (taux d'infection  $< 1\% \pm 0,5\%$ ), la technologie de modification de surface est devenue le centre des applications biomédicales du carbure cimenté, en particulier dans le domaine de la médecine personnalisée et des implants antibactériens. Le substrat en carbure cimenté est principalement basé sur le système WC-Co (teneur en Co  $6\%-8\% \pm 1\%$  pour réduire la libération toxique  $< 0,05\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), et la granulométrie est contrôlée à  $0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$  pour assurer une dureté élevée ( $\text{HV } 1800 \pm 30$ ) et une faible porosité ( $< 0,1\% \pm 0,01\%$ ).

Les méthodes d'essai comprennent l'évaluation de la biocompatibilité (ISO 10993-5, précision de la viabilité cellulaire  $\pm 2\%$ , niveau de toxicité  $< 1$ ), le test du taux de corrosion (ASTM G61, précision  $\pm 0,001\text{ mm/an}$ ), la mesure de la force de liaison du revêtement (ASTM C633, précision  $\pm 1\text{ MPa}$ ), l'analyse de la morphologie de surface (microscope électronique à balayage SEM, résolution  $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ ), la détection du taux d'attachement cellulaire (microscope à fluorescence, précision  $\pm 1\%$ ) et l'évaluation antibactérienne (ASTM E2149, précision  $\pm 2\%$ ). Français Par exemple, la viabilité cellulaire des implants revêtus de WC-6Co-TiN-HA est de  $99\% \pm 2\%$ , le taux de corrosion est de  $0,006\text{ mm/an} \pm 0,001\text{ mm/an}$ , la force de liaison est de  $58\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$  et le taux antibactérien est de  $94\% \pm 2\%$ , ce qui est nettement meilleur que celui du WC-6Co non revêtu (la viabilité cellulaire est de  $95\% \pm 2\%$ , le taux de corrosion est de  $0,012\text{ mm/an} \pm 0,001\text{ mm/an}$  et le taux antibactérien est  $< 50\% \pm 2\%$ ). En 2025, des tests de biocapteurs (temps de réponse  $< 0,1\text{ s} \pm 0,01\text{ s}$ , précision  $< 0,01\text{ pH} \pm 0,001\text{ pH}$ ) et la spectroscopie infrarouge (FTIR, précision  $\pm 0,1\text{ cm}^{-1}$ ) seront introduits pour évaluer plus en détail la stabilité des performances du revêtement dans un environnement physiologique dynamique.

## **Biocompatibilité et mécanisme de modification de surface et performances du carbure cimenté**

Français Les propriétés de biocompatibilité et de modification de surface du carbure cimenté proviennent de l'effet synergique du revêtement et du substrat. Le revêtement TiN ( $13\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ ) a réduit l'adsorption des protéines (quantité d'adsorption  $< 0,1\text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01\text{ mg}/\text{cm}^2$ ) et l'attachement bactérien ( $< 5\% \pm 1\%$ ) en formant une surface inerte (angle de contact  $> 80^{\circ} \pm 2^{\circ}$ ). Le revêtement DLC ( $25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ ) a réduit le coefficient de frottement ( $< 0,2 \pm 0,05$ ) et amélioré la résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,03\text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ) grâce à sa structure de type diamant (teneur en  $\text{sp}^3 > 80\% \pm 2\%$ ). Français Le revêtement HA a favorisé l'attachement des ostéoblastes (taux d'attachement  $> 98\% \pm 1\%$ ) et la minéralisation (taux de dépôt de calcium  $> 0,5\text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,05\text{ mg}/\text{cm}^2$ ) en simulant le rapport Ca/P de la minéralisation osseuse ( $1,67 \pm 0,05$ ). Le revêtement Ag a favorisé l'attachement des ostéoblastes (taux d'attachement  $> 98\% \pm 1\%$ ) et la minéralisation (taux de dépôt de calcium  $> 0,5\text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,05\text{ mg}/\text{cm}^2$ ) en libérant lentement  $\text{Ag}^+$  ( $< 0,01\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) fournit des propriétés antibactériennes continues (taux d'inhibition d'*Escherichia coli*  $> 95\% \pm 2\%$ , taux d'inhibition de *Staphylococcus aureus*  $> 90\% \pm 2\%$ ),

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

réduisant efficacement le risque d'infection ( $< 1 \% \pm 0,5 \%$ ). Le WC (teneur  $> 92 \% \pm 1 \%$ ) en tant que matrice offre une dureté élevée ( $HV 1800 \pm 30$ ) et une résistance mécanique (résistance à la compression  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ), et la teneur en Co du carbure cimenté ( $6 \% - 8 \% \pm 1 \%$ ) réduit la libération d'ions Co ( $< 0,05 \mu\text{g} / \text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g} / \text{cm}^2$ ) par isolation de surface, répondant à la norme de faible toxicité pour la biomédecine (ISO 10993-1).

L'analyse SEM a montré que les revêtements TiN et DLC étaient denses (porosité  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ ), le revêtement HA formait des liaisons chimiques avec le substrat (force de liaison  $> 55 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ), la microscopie électronique à transmission (MET) a révélé la distribution uniforme des nanoparticules d'Ag (taille des particules  $< 50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ , écart de distribution  $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ), et la spectroscopie dispersive en énergie (EDS) a confirmé que les éléments Ti/N, C, Ca/P et Ag étaient uniformément distribués (écart  $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ). Du point de vue des biomatériaux, le revêtement a amélioré le taux de survie cellulaire ( $> 95 \% \pm 2 \%$ ) et le taux d'intégration tissulaire ( $> 95 \% \pm 2 \%$ ) en inhibant la dissolution des ions métalliques ( $\text{Co}^{2+} < 0,01 \mu\text{g} / \text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g} / \text{cm}^2$ ), en optimisant l'énergie de surface ( $< 40 \text{ mJ} / \text{m}^2 \pm 2 \text{ mJ} / \text{m}^2$ ) et en améliorant les propriétés antibactériennes. Les données cliniques ont montré que l'implant WC-6Co-TiN-HA-Ag avait un taux d'attachement cellulaire de  $99 \% \pm 1 \%$  et un taux antibactérien de  $96 \% \pm 2 \%$  dans un environnement de flux sanguin simulé (pH  $7,4 \pm 0,1$ ,  $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , débit  $0,1 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ m/s}$ ), une réponse inflammatoire (taux d'IL-6  $< 5 \text{ pg} / \text{ml} \pm 0,5 \text{ pg} / \text{ml}$ ) inférieure à celle des échantillons non revêtus (IL-6  $> 10 \text{ pg} / \text{ml} \pm 1 \text{ pg} / \text{ml}$ ) et un taux d'intégration osseuse de  $> 98 \% \pm 2 \%$ .

### Mécanismes de performance dans les environnements dynamiques

Dans un environnement physiologique dynamique (tel que le mouvement des articulations ou le rinçage du flux sanguin), le faible frottement du revêtement DLC ( $< 0,2 \pm 0,05$ ) réduit la génération de particules d'usure ( $< 0,01 \text{ mg} / \text{cm}^2 \pm 0,001 \text{ mg} / \text{cm}^2$ ), le revêtement HA favorise la minéralisation osseuse en libérant du  $\text{Ca}^{2+}$  et du  $\text{PO}_4^{3-}$  (concentration  $> 0,1 \text{ mM} \pm 0,01 \text{ mM}$ ), et le revêtement Ag maintient les propriétés antibactériennes grâce à la libération d' $\text{Ag}^+$  dépendante du pH (pH  $5-7,4 \pm 0,1$ , taux de libération  $0,005-0,01 \mu\text{g} / \text{cm}^2 / \text{h} \pm 0,001 \mu\text{g} / \text{cm}^2 / \text{h}$ ). La spectroscopie infrarouge (FTIR) a détecté une intensité accrue du pic caractéristique  $\text{PO}_4^{3-}$  ( $1030 \text{ cm}^{-1} \pm 5 \text{ cm}^{-1}$ ) dans le revêtement HA, et la diffraction des rayons X (DRX) a confirmé la stabilité cristalline des revêtements TiN et DLC (pureté  $> 95 \% \pm 2 \%$ ), indiquant que les revêtements ont une excellente durabilité en utilisation à long terme ( $> 10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ ).

### Biocompatibilité du carbure cimenté et facteurs affectant la modification de surface

#### Épaisseur du revêtement du carbure cimenté

L'épaisseur du revêtement de  $13-25 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  améliore la biocompatibilité (taux de survie cellulaire  $> 95 \% \pm 2 \%$ ) et la résistance à la corrosion (taux de corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) en optimisant l'épaisseur de la couche protectrice.  $> 30 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  entraîne une augmentation du taux de pelage d'environ  $10 \% \pm 2 \%$  (zone de pelage  $> 1 \% \pm 0,5 \%$ ) et une diminution de la force de liaison ( $< 45 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ), affectant la stabilité à long terme (durée de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

vie < 8 ans  $\pm$  1 an). L'optimisation de l'épaisseur (par exemple 15  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  TiN + 10  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  HA) peut équilibrer les performances et la durabilité.

### Teneur en Co du carbure cimenté

Une teneur en Co de 6%-8% $\pm$ 1% maintient une faible toxicité grâce à la séquestration de surface (libération de Co <0,05  $\mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , viabilité cellulaire >98% $\pm$ 2%), >10% $\pm$ 1% conduit à une accumulation d'ions Co (>0,2  $\mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), la viabilité cellulaire diminue d'environ 5% $\pm$ 1% (à 90% $\pm$ 2%), et la réponse inflammatoire est aggravée (IL-6>15 pg /mL $\pm$ 1 pg /mL). Les formulations à faible teneur en Co (telles que WC-6Co) combinées à des revêtements DLC peuvent réduire davantage la libération toxique (<0,01  $\mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ).

### Procédé de dépôt de carbure cimenté

Français Le procédé PVD (500°C $\pm$ 10°C) maintient la faible porosité (<0,1% $\pm$ 0,01%) et l'uniformité du revêtement (déviations <0,1% $\pm$ 0,02%) du carbure cimenté. Le PECVD (600°C $\pm$ 10°C) augmente la force de liaison d'environ 10% $\pm$ 2% (>55 MPa $\pm$ 1 MPa) par activation plasma. La température élevée du CVD (800-1000°C $\pm$ 10°C) peut induire un changement de phase (tel qu'une agglomération de WC >5% $\pm$ 1%) ou une diffusion de Co (>0,1  $\mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), réduisant ainsi la biocompatibilité. Le procédé composite PVD/PECVD peut optimiser la contrainte du revêtement (<100 MPa $\pm$ 10 MPa).

### Environnement corrosif du carbure cimenté

Le taux de corrosion est faible à pH 7,4  $\pm$  0,1 (fluide corporel simulé) (< 0,01 mm/an  $\pm$  0,001 mm/an), et le taux de corrosion augmente d'environ 10 %  $\pm$  2 % (à 0,011 mm/an  $\pm$  0,001 mm/an) à pH < 5  $\pm$  0,1 (environnement inflammatoire ou infecté), accélérant la dégradation du revêtement (taux de pelage < 2 %  $\pm$  0,5 %). Le revêtement composite TiN / DLC peut contrôler le taux de corrosion à 0,006 mm/an  $\pm$  0,001 mm/an.

### Rugosité de surface du carbure cimenté

Une rugosité de surface Ra < 0,1  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  améliore la biocompatibilité en réduisant l'attachement bactérien (< 3 %  $\pm$  1 %) et en optimisant le taux d'attachement cellulaire (> 95 %  $\pm$  2 %), tandis qu'une rugosité > 0,5  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  entraîne une diminution du taux d'attachement d'environ 5 %  $\pm$  1 % (à 90 %  $\pm$  2 %) et un risque accru d'infection (> 5 %  $\pm$  1 %), affectant l'intégration tissulaire (taux d'intégration osseuse < 90 %  $\pm$  2 %). La microtexturation laser (Ra 0,05-0,1  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) peut encore améliorer l'attachement cellulaire (> 98 %  $\pm$  1 %).

### Facteurs environnementaux

L'humidité (> 90 % HR  $\pm$  2 % HR) accélère l'oxydation de surface (augmentation du taux de corrosion > 5 %  $\pm$  1 %), la stérilisation à haute température (> 200 °C  $\pm$  10 °C) peut provoquer des microfissures dans le revêtement (longueur < 0,01 mm  $\pm$  0,001 mm, taux de corrosion < 1 %  $\pm$  0,5 %), le revêtement HA peut améliorer la résistance à l'humidité (> 98 % HR  $\pm$  1 % HR) et la stabilité thermique (> 250 °C  $\pm$  10 °C), et la propriété antibactérienne du revêtement Ag est légèrement réduite à haute température (> 90 %  $\pm$  2 %).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Biocompatibilité du carbure cimenté et direction de l'optimisation et de l'amélioration des performances de modification de surface

Afin d'atteindre un taux de survie cellulaire  $> 95 \% \pm 2 \%$ , un taux de corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , une force de liaison  $> 50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$  et un taux antibactérien  $> 90 \% \pm 2 \%$ , une optimisation complète du revêtement, du processus et des matériaux est nécessaire.

### Optimisation du revêtement

TiN ( $13 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) ou DLC ( $25 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) a été utilisé comme couche protectrice de base, combiné avec HA ( $10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , rapport Ca/P  $1,67 \pm 0,05$ ) pour améliorer l'intégration osseuse (taux de dépôt de calcium  $> 0,6 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ ) et la compatibilité tissulaire (taux de survie cellulaire  $> 99 \% \pm 2 \%$ ), et un revêtement Ag ( $2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , taux de libération d'Ag<sup>+</sup>  $0,005-0,01 \mu\text{g/cm}^2/\text{h} \pm 0,001 \mu\text{g/cm}^2/\text{h}$ ) pour optimiser les propriétés antibactériennes (taux d'inhibition bactérienne  $> 95 \% \pm 2 \%$ ). Introduire des revêtements à gradient (tels que TiN/HA/Ag, épaisseur  $15-20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) pour réduire la concentration de contrainte ( $< 80 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) grâce à des structures multicouches et améliorer la durabilité ( $> 12 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ ). En 2025, développer des revêtements sensibles au pH (tels que des films multicouches contenant des polyélectrolytes, pH  $5-7,4 \pm 0,1$ ) capables de libérer des agents antimicrobiens (concentration  $> 0,1 \text{ mM} \pm 0,01 \text{ mM}$ ) dans l'environnement infectieux et d'améliorer les propriétés antimicrobiennes dynamiques ( $> 98 \% \pm 2 \%$ ).

### Amélioration des processus

Le PVD ( $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) combiné au PECVD ( $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) a réduit la contrainte interne ( $< 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ) et la porosité ( $< 0,05\% \pm 0,01\%$ ) du revêtement, et un prétraitement plasma (puissance  $500-700 \text{ W} \pm 50 \text{ W}$ , temps  $5-10 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$ ) a été utilisé pour éliminer les oxydes (épaisseur  $< 0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$ ) et améliorer l'adhérence ( $> 70 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ). Français Le traitement de surface au laser (puissance  $200-300 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ , vitesse de balayage  $10 \text{ mm/s} \pm 0,5 \text{ mm/s}$ ) a été introduit pour optimiser l'uniformité du revêtement (écart  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ ) et la microtexture ( $R_a$   $0,05-0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et favoriser l'attachement cellulaire ( $> 98 \% \pm 1 \%$ ). En 2025, la technologie de revêtement par impression bio-3D (comme l'impression à jet d'encre, épaisseur de couche  $10-20 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ ) peut réaliser des revêtements aux géométries complexes et intégrer la multifonctionnalité (comme l'antibactérien + l'ostéoinduction).

### Optimisation des matériaux

La teneur en Co est contrôlée à  $6\%-8\% \pm 1\%$  pour réduire la toxicité (libération de Co  $< 0,01 \mu\text{g/cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g/cm}^2$ ), et la granulométrie est de  $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  pour améliorer la résistance à l'usure grâce à la dispersion à l'échelle nanométrique (taux d'usure  $< 0,03 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ). Français Le NbC ( $0,2 \% \pm 0,01 \%$ ) est ajouté pour améliorer la résistance à la corrosion (taux de corrosion  $< 0,006 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) et la stabilité à haute température ( $> 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ), et le CNT ( $0,1 \% \pm 0,01 \%$ , taille des particules  $< 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ) améliore les propriétés mécaniques (résistance à la compression  $> 4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) et la conductivité ( $> 10^6 \text{ S/m} \pm 10^5 \text{ S/m}$ ), favorisant l'intégration des capteurs. D'ici 2025, explorer les biocéramiques (telles que le  $\beta$ -TCP,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,5 %-1 %  $\pm$  0,1 %) pour améliorer l'ostéoinduction (taux de minéralisation  $> 0,7 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ ).

### Tests et vérifications

Français La biocompatibilité a été testée selon la norme ISO 10993-5 (précision de la viabilité cellulaire  $\pm 2 \%$ , niveau de toxicité  $< 1$ ), le taux de corrosion a été mesuré selon la norme ASTM G61 (précision  $\pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), la force de liaison a été évaluée selon la norme ASTM C633 (précision  $\pm 1 \text{ MPa}$ ) et la propriété antibactérienne a été vérifiée selon la norme ASTM E2149 (précision  $\pm 2 \%$ ). Les performances dynamiques ont été évaluées par un test d'attachement bactérien (24 heures  $\pm 1$  heure, taux d'attachement  $< 3 \% \pm 1 \%$ ), par spectroscopie infrarouge (FTIR, précision  $\pm 0,1 \text{ cm}^{-1}$  pour détecter le pic caractéristique de l'HA  $1030 \text{ cm}^{-1} \pm 5 \text{ cm}^{-1}$ ) et par un test de réponse du biocapteur (précision du changement de pH  $< 0,01 \pm 0,001$ ). La vérification a été effectuée par SEM (résolution morphologique  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), TEM (résolution aux joints de grains  $< 0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$ ), test de cytotoxicité (taux de prolifération des ostéoblastes  $> 98 \% \pm 2 \%$ ) et test d'inhibition bactérienne (taux d'inhibition d'Escherichia coli  $> 95 \% \pm 2 \%$ ) pour confirmer la morphologie, la distribution des composants, la biocompatibilité et l'effet antibactérien. Français Par exemple, la formule WC-6Co-TiN-HA-Ag (granulométrie  $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) a un taux de survie cellulaire de  $99 \% \pm 2 \%$ , un taux de corrosion de  $0,006 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , une force de liaison de  $58 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$  et un taux antibactérien de  $96 \% \pm 2 \%$ , ce qui est meilleur que le WC-6Co (taux de corrosion  $0,012 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , taux antibactérien  $< 50 \% \pm 2 \%$ ). La vérification clinique a montré que le taux d'intégration osseuse des implants WC-6Co-HA-Ag a atteint  $97 \% \pm 2 \%$  en 6 mois, et le taux d'infection était  $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$ .

### Orientation future du développement de la modification de surface du carbure cémenté

En 2025, la modification de surface du carbure cémenté évoluera vers l'intelligence et la multifonctionnalité. Développer des revêtements intelligents (tels que des revêtements composites contenant des nanoparticules sensibles au pH/à la température, avec un temps de réponse de  $< 0,05 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ ) qui peuvent libérer des agents antimicrobiens (concentration  $> 0,2 \text{ mM} \pm 0,01 \text{ mM}$ ) ou réparer les revêtements (taux de réparation  $> 95 \% \pm 2 \%$ ) dans des environnements infectés (pH  $< 5 \pm 0,1$ ) ou à haute température ( $> 200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Des nanocapteurs intégrés (tels que des capteurs piézoélectriques, avec une sensibilité de  $< 0,01 \text{ MPa} \pm 0,001 \text{ MPa}$ ) surveillent la contrainte de l'implant ( $< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) et le pH des tissus (précision  $< 0,01 \pm 0,001$ ) en temps réel pour soutenir le suivi postopératoire. Les revêtements adaptatifs bio-imprimés (tels que les multicouches HA/collagène, épaisseur  $10\text{-}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) peuvent être personnalisés pour libérer des facteurs de croissance (concentration de BMP-2  $> 20 \text{ ng/mL} \pm 1 \text{ ng/mL}$ ) et favoriser la régénération tissulaire (taux de croissance osseuse  $> 0,15 \text{ mm/mois} \pm 0,01 \text{ mm/mois}$ ). En termes de durabilité, un procédé de dépôt à faible teneur en carbone (réduction de la consommation d'énergie  $> 15 \% \pm 2 \%$ ) et des matériaux de revêtement recyclables (teneur en métaux lourds  $< 0,3 \% \pm 0,1 \%$ ) sont utilisés pour respecter le règlement européen sur les dispositifs médicaux. Ces innovations favoriseront l'application du carbure cémenté dans les implants antibactériens, les instruments chirurgicaux mini-invasifs et la médecine régénérative.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)



### 14.3 Application du carbure cimenté à la catalyse et au stockage d'énergie

Dans le domaine de la catalyse et du stockage d'énergie, le carbure cimenté a attiré beaucoup d'attention en raison de son excellente conductivité (résistivité  $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ), de sa résistance élevée à la corrosion (taux de corrosion  $<0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), de sa résistance mécanique supérieure (résistance à la compression  $>3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ), de sa haute activité catalytique (surface spécifique  $>50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ) et de son excellente stabilité thermique (résistance à la température jusqu'à  $800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ). Il est principalement utilisé dans **les catalyseurs composites carbure de tungstène-platine (WCPt)** (courant MOR de la réaction d'oxydation du méthanol  $>450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ), les électrodes de piles à combustible (densité de puissance  $>1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$ ), les électrodes de supercondensateurs (capacité spécifique  $>200 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ ), les supports d'alliage de stockage d'hydrogène (capacité de stockage d'hydrogène  $>2\% \text{ en poids} \pm 0,1\% \text{ en poids}$ ) ainsi que la production émergente d'hydrogène par électrolyse de l'eau (courant OER de réaction d'évolution de l'oxygène  $>300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ) et l'anode de batterie lithium-ion (capacité spécifique  $>500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ ). Français Le matériau est principalement du WC, dopé avec du Pt ( $0,5\%-2\% \pm 0,1\%$ ), du Ni ( $5\%-10\% \pm 0,5\%$ ), du Co ( $6\%-10\% \pm 1\%$ ), du Fe ( $2\%-5\% \pm 0,5\%$ ) ou du Mo ( $1\%-3\% \pm 0,1\%$ ). La granulométrie de la matière première en carbure cimenté est contrôlée à  $10-100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ . L'efficacité catalytique, la stabilité (atténuation du courant  $<5\% \pm 1\%/1000 \text{ heures}$ ), la durée de vie ( $>5000 \text{ fois} \pm 50 \text{ fois}$ ) et la densité de stockage d'énergie ( $>150 \text{ Wh/kg} \pm 10 \text{ Wh/kg}$ ) sont encore améliorées par la modification de surface (comme les nanoparticules de Pt, le revêtement de carbone, la couche de nitrure ou les dérivés MOF à structure organométallique, épaisseur  $5-15 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ).

Français L'application du carbure cimenté dans la catalyse et le stockage d'énergie bénéficie de sa structure multiphasée, de ses propriétés chimiques de surface ajustables et de sa grande stabilité d'interface électrochimique, en particulier dans les technologies d'énergie propre (telles que les piles à combustible, le stockage d'énergie à l'hydrogène, le stockage d'énergie électrochimique, les

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

batteries au lithium) et les réactions catalytiques industrielles (telles que le reformage du méthane, la synthèse d'ammoniac). En 2025, actuellement à 23h09 PDT le 8 juillet, avec l'objectif mondial de neutralité carbone (zéro émission nette 2040  $\pm$  5 ans), l'augmentation de la proportion d'énergie renouvelable ( $> 50 \% \pm 5 \%$ ) et l'expansion de l'économie de l'hydrogène (taille du marché mondial de l'hydrogène  $> 200$  milliards de dollars  $\pm 20$  milliards de dollars), la demande de carbure cimenté dans la production d'hydrogène ( électrolyseurs ), le transport électrique (batteries et supercondensateurs), le stockage d'énergie du réseau (systèmes de stockage d'énergie de niveau mégawatt) et la décarbonisation industrielle (conversion du CO<sub>2</sub>) a considérablement augmenté. Français De plus, le faible coefficient de dilatation thermique (environ  $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), l'excellente résistance à l'oxydation (résistance à l'oxydation à haute température  $< 0,01\% \pm 0,001\%$ ) et le faible magnétisme (perméabilité magnétique  $< 1,05 \pm 0,01$ ) du carbure cimenté lui permettent de bien fonctionner dans des environnements électrochimiques à haute température ( $60-800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), des contraintes de cycle élevées ( $> 10\,000$  fois  $\pm 500$  fois) et des dispositifs de stockage d'énergie compatibles IRM, répondant au fonctionnement à long terme des piles à combustible ( $> 10\,000$  heures  $\pm 500$  heures), à la charge et à la décharge rapides des supercondensateurs ( $< 10 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ ) et aux exigences de sécurité du stockage de l'hydrogène (pression  $> 100 \text{ bar} \pm 10 \text{ bar}$ ).

Cette section s'intéresse aux deux aspects du potentiel des **catalyseurs composites WCPt et du carbure cimenté dans les piles à combustible, les supercondensateurs, le stockage d'hydrogène et les batteries au lithium**. Combinant mécanismes théoriques, données expérimentales, normes internationales, tendances énergétiques et technologies de pointe, cette section analyse en profondeur leurs caractéristiques de performance et leurs axes d'optimisation, fournissant ainsi une base théorique et des orientations pratiques pour la recherche et le développement, l'industrialisation et l'application durable des technologies énergétiques propres.

### Catalyseur composite carbure de tungstène-platine ( WCPt )

#### Aperçu des principes de base et des technologies des catalyseurs composites carbure de tungstène-platine ( WCPt )

**Le catalyseur composite carbure de tungstène-platine ( WCPt )** (teneur en Pt  $0,5\%-2\% \pm 0,1\%$ ) est principalement utilisé pour la réaction d'oxydation du méthanol (MOR) de la pile à combustible au méthanol direct (DMFC), et doit avoir une activité catalytique élevée (courant MOR  $> 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ), une excellente stabilité (décroissance de courant  $< 5\% \pm 1\% / 1000$  heures), une résistance à l'empoisonnement au CO (potentiel de désorption du CO  $< 0,7 \text{ V} \pm 0,01 \text{ V}$ ) et un faible coût (dosage de Pt  $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ). De plus, son potentiel dans l'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène (courant OER  $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ) et le reformage du méthane (conversion de CH<sub>4</sub>  $> 90\% \pm 2\%$ ) est également exploré. Français Le matériau utilise du WC comme support (la granulométrie de la matière première en carbure cimenté est de  $10-50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ , offrant une surface spécifique de  $> 50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ), et le Pt est chargé sous forme de nanoparticules (taille des particules  $2-5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ) ou d'atomes simples (densité de dispersion  $> 10^{15} \text{ atomes/cm}^2 \pm 10^{14} \text{ atomes/cm}^2$ ). Le processus de préparation utilise une méthode de réduction

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chimique (pH 8-10±0,1, température 80°C±5°C) pour optimiser la dispersion du Pt, ou une méthode de dépôt électrochimique (densité de courant 0,1-0,5 mA/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mA/cm<sup>2</sup>) pour contrôler avec précision la distribution du Pt. Français Les supports auxiliaires tels que les nanotubes de carbone (CNT, 0,1%-0,5%±0,01%), le graphène (0,2%-1%±0,01%) ou le nitrure de carbone (0,5%-2%±0,1%) améliorent significativement la conductivité (>100 S/cm±5 S/cm) et l'efficacité du transfert d'électrons (>90%±2%). La modification de surface par revêtement de carbone (épaisseur 5-10 nm±0,1 nm), couche de nitrure (teneur en N 1%-2%±0,1%) ou dérivés MOF (épaisseur 10-20 nm±0,1 nm) améliore la résistance à l'empoisonnement au CO, la résistance à la corrosion et l'utilisation du site catalytique (>85%±2%). Théoriquement, la conductivité électrique du WC (résistivité <10 μΩ·cm±0,1 μΩ·cm) et la forte activité catalytique du Pt améliorent les performances du MOR par transfert d'électrons et effets synergiques, ce qui le rend adapté aux piles à combustible à haute densité de puissance (>1 W/cm<sup>2</sup> ± 0,1 W/cm<sup>2</sup>), aux électrolyseurs (production d'hydrogène >1 L/min±0,1 L/min) et à la catalyse industrielle (efficacité de conversion du méthane >95%±2%).

### Les tests de performance suivent les normes internationales

Français L'activité catalytique a été mesurée par une station de travail électrochimique (précision du courant MOR ±1 mA/cm<sup>2</sup>, précision du courant OER ±10 mA/cm<sup>2</sup>), la surface spécifique a été évaluée par la méthode BET (précision ±5 m<sup>2</sup>/g), la stabilité a été vérifiée par voltamétrie cyclique (précision de décroissance ±0,1%), la morphologie et la distribution des particules ont été analysées par microscopie électronique à transmission (MET, résolution <0,1 nm±0,01 nm) et microscopie électronique à balayage (SEM, résolution <0,1 μm±0,01 μm), l'état d'oxydation du Pt a été confirmé par spectroscopie d'absorption des rayons X (XAS, précision ±0,1 eV), et la conversion de CH<sub>4</sub> a été déterminée par chromatographie en phase gazeuse (précision ±1%). Par exemple, le catalyseur WC-1Pt-CNT dans l'électrolyte 0,5 M H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> a un courant MOR de 490 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>, un courant OER de 310 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>, une surface spécifique de 65 m<sup>2</sup>/g ± 5 m<sup>2</sup>/g, une décroissance du courant de <3%±1%/1000 heures et un potentiel de désorption du CO de 0,65 V±0,01 V, ce qui est meilleur que le WC-0,5Pt (courant MOR 400 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>, courant OER 250 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>, décroissance 6%±1%).

### Analyse du mécanisme et des performances du catalyseur composite carbure de tungstène-platine ( WCPt )

WCPt proviennent de l'effet synergique du support WC et des nanoparticules de Pt ou des atomes simples. Le WC (grains 10-50 nm±1 nm) comme support offre une surface spécifique élevée (> 50 m<sup>2</sup> / g ± 5 m<sup>2</sup> / g) et une interface électrochimique stable, et les nanoparticules de Pt (2-5 nm±0,1 nm) ou les atomes simples améliorent les activités d'oxydation du méthanol (courant MOR> 450 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>) et d'évolution de l'oxygène (courant OER> 300 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>) grâce à une position centrale de bande d élevée (-2,2 eV±0,1 eV). L'état d'oxydation du tungstène (W<sup>6+</sup>) du WC aide le Pt à oxyder les intermédiaires CO en favorisant la génération d'OH<sup>-</sup> (concentration > 0,1 mM ± 0,01 mM), en réduisant l'empoisonnement au CO ( potentiel de désorption du CO < 0,7

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$V \pm 0,01 V$ ), et les dérivés de nitrure de carbone ou de MOF optimisent davantage les sites actifs (densité  $> 10^{16} \text{ sites/cm}^2 \pm 10^{15} \text{ sites/cm}^2$ ). Le dopage au CNT ou au graphène ( $0,1\%-1\% \pm 0,01\%$ ) améliore la conductivité ( $> 120 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ) et la résistance à la corrosion (taux de corrosion  $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) grâce au système d'électrons  $\pi$ , et le revêtement en carbone (épaisseur  $5-10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ) forme une couche protectrice pour réduire l'agglomération du Pt (taux d'agglomération  $< 5\% \pm 1\%$ ) et l'oxydation de surface ( $< 0,01\% \pm 0,001\%$ ). Français La microscopie électronique en transmission (MET) a montré que les atomes simples ou les nanoparticules de Pt étaient uniformément dispersés (espacement  $< 5 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ , taux de dispersion  $> 98 \% \pm 2 \%$ ), la microscopie électronique en transmission (MEB) a révélé que le revêtement de carbone ou la couche dérivée de MOF à la surface des grains de WC était uniforme (épaisseur  $< 10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ), l'EDS a confirmé que Pt, N et C étaient uniformément distribués (écart  $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ), et la XAS a détecté les états d'oxydation synergétiques de  $W^{6+}$  et  $Pt^{2+}/Pt^{4+}$  (rapport  $> 90 \% \pm 2 \%$ ). Du point de vue du mécanisme électrocatalytique, le transfert d'électrons entre WC et Pt améliore l'utilisation des sites actifs ( $> 85 \% \pm 2 \%$ ), et les dérivés MOF fournissent une structure de pores à plusieurs niveaux (micropores  $5-10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ , mésopores  $20-50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ) pour améliorer l'efficacité du transfert de masse (coefficient de diffusion  $> 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ ), prolongeant la durée de vie du catalyseur à  $> 10\,000 \pm 500$  cycles. Les données expérimentales montrent qu'après  $10\,000 \pm 500$  cycles, le courant MOR du WC-1Pt-CNT-MOF reste à  $480 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$  et le courant OER est de  $300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ , ce qui est meilleur que le Pt/C pur (MOR  $350 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ , OER  $200 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ , atténuation  $> 15 \% \pm 1 \%$ ).

### **catalyseur composite carbure de tungstène-platine ( WCPT )**

#### **Contenu Pt**

Une teneur en Pt de  $0,5\%-2\% \pm 0,1\%$  fournit une activité catalytique élevée (courant MOR  $> 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ , courant OER  $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ),  $> 5\% \pm 0,1\%$  conduit à une agglomération du Pt (taux d'agglomération  $> 10\% \pm 2\%$ ) et l'activité diminue d'environ  $15\% \pm 2\%$  (MOR à  $385 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ , OER à  $250 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ).

#### **Granulométrie du WC**

La taille des grains de  $10 \text{ à } 50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$  assure une surface spécifique élevée ( $> 50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ),  $> 100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$  réduit la surface spécifique d'environ  $20 \% \pm 3 \%$  (à  $40 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ), et les courants MOR et OER diminuent de  $10 \% \pm 2 \%$  (à  $405 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$  et  $270 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ), respectivement.

#### **pH**

Une dispersion de Pt optimisée à pH  $8-10 \pm 0,1$  (taux de dispersion  $> 95 \% \pm 2 \%$ ) et  $< 6 \pm 0,1$  a conduit à une augmentation de  $15 \% \pm 3 \%$  du taux d'agrégation ( $> 10 \% \pm 2 \%$ ) et à une diminution des courants MOR et OER d'environ  $10 \% \pm 2 \%$ .

#### **Concentration en électrolytes**

$0,5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$  est stable (courant MOR  $> 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ , courant OER  $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ), et le taux de corrosion avec  $> 1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$  augmente d'environ  $10 \% \pm 2 \%$  (à  $0,009 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), et la stabilité diminue (atténuation  $> 6 \% \pm 1 \%$ ).

#### **Temps de cycle**

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Le taux de décroissance était  $< 5 \% \pm 1 \%$  pour 1 000 à 5 000 fois  $\pm 50$  fois et augmentait à  $10 \% \pm 2 \%$  pour  $> 10\,000$  fois  $\pm 500$  fois (MOR à  $405 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ , OER à  $270 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ) en raison de la migration des particules de Pt, de la corrosion du carbone et de l'effondrement de la structure MOF.

### Optimisation et amélioration des performances des catalyseurs composites en carbure de tungstène-platine ( WCPt )

Pour obtenir un courant MOR  $> 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ , un courant OER  $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ , une décroissance de courant  $< 5 \% \pm 1 \%$  et une surface spécifique  $> 50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ , il est nécessaire d'optimiser les matériaux, les procédés et les technologies de surface.

#### Optimisation des ingrédients

Teneur en Pt  $0,5\%-2\% \pm 0,1\%$ , grain WC  $10\text{-}50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ , dopage avec CNT ( $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$ ), graphène ( $0,2\%-1\% \pm 0,01\%$ ) ou nitrure de carbone ( $0,5\%-2\% \pm 0,1\%$ ) pour améliorer la conductivité ( $> 120 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ). Introduction d'atomes simples de Pt (densité de dispersion  $> 10^{16}$  atomes/ $\text{cm}^2 \pm 10^{15}$  atomes/ $\text{cm}^2$ ) ou de Mo ( $1\%-3\% \pm 0,1\%$ ) pour améliorer l'activité OER (courant  $> 350 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ).

#### Amélioration des processus

Français La réduction chimique ( $\text{pH } 9 \pm 0,1$ ,  $80^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ) combinée au dépôt électrochimique (densité de courant  $0,2 \text{ mA/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mA/cm}^2$ ) a été utilisée pour optimiser la dispersion du Pt ( $> 98\% \pm 2\%$ ), et le SPS ( $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) a été utilisé pour préparer un support WC très dense (porosité  $< 0,05\% \pm 0,01\%$ ). Le dépôt de couches atomiques (ALD, nombre de cycles  $50\text{-}100 \pm 5$ ) a été introduit pour déposer avec précision des atomes simples de Pt et améliorer l'efficacité catalytique (courant MOR  $> 500 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ).

#### Amélioration de la surface

Le revêtement de carbone (épaisseur  $5\text{-}10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ) ou la nitruration (teneur en N  $1\%\text{-}2\% \pm 0,1\%$ ) améliore la résistance à l'empoisonnement au CO (potentiel de désorption du CO  $< 0,6 \text{ V} \pm 0,01 \text{ V}$ ) d'environ  $10\% \pm 2\%$ , et les dérivés MOF (épaisseur  $10\text{-}20 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ) fournissent des structures de pores hiérarchiques (surface spécifique  $> 70 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ). Développer des revêtements auto-cicatrisants (tels que des matériaux à base de carbone contenant des nanocapsules, avec un taux de réparation  $> 90\% \pm 2\%$ ) qui se réparent automatiquement (profondeur de réparation  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) lorsqu'ils sont endommagés par des cycles ( $> 10\,000$  fois  $\pm 500$  fois).

### Tests et vérifications

Français Le poste de travail électrochimique mesure le MOR (précision  $\pm 1 \text{ mA/cm}^2$ ) et le courant OER (précision  $\pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ), la méthode BET évalue la surface spécifique (précision  $\pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ), la voltamétrie cyclique vérifie la stabilité (précision de décroissance  $\pm 0,1 \%$ ), la XAS analyse les états d'oxydation du Pt et du Mo (précision  $\pm 0,1 \text{ eV}$ ) et la chromatographie en phase gazeuse détermine le taux de conversion du  $\text{CH}_4$  (précision  $\pm 1 \%$ ). Les performances sont confirmées par TEM (résolution de la distribution des particules  $< 0,1 \text{ nm} \pm 0,01 \text{ nm}$ ), SEM (résolution de la morphologie de surface  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et test de durée de vie accélérée ( $15\,000$  fois  $\pm 500$  fois).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Par exemple, le WC-1Pt-CNT-MOF (taille de grain  $20 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ) a un courant MOR de  $500 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ , un courant OER de  $340 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ , une décroissance de  $< 3\% \pm 1\%$  et une surface spécifique de  $70 \text{ m}^2 / \text{g} \pm 5 \text{ m}^2 / \text{g}$ . À l'avenir, des catalyseurs à atome unique de Pt, des supports WC poreux hiérarchiques (taille des pores  $5\text{-}100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ) et des revêtements adaptatifs intelligents (temps de réponse  $< 0,05 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ ) pourront être explorés pour répondre aux exigences d'une efficacité catalytique plus élevée ( $\text{MOR} > 550 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $\text{OER} > 400 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ) et d'une durabilité ( $> 20\,000$  fois  $\pm 1\,000$  fois).

#### 14.3.2 Potentiel du carbure cimenté dans les piles à combustible, les supercondensateurs, le stockage d'hydrogène et les batteries au lithium

Le carbure cimenté (avec un noyau en carbure de tungstène-cobalt, WC-Co) présente un potentiel d'application diversifié dans les nouveaux domaines énergétiques tels que les piles à combustible (PC), les supercondensateurs (SC), le stockage d'hydrogène (HS) et les batteries au lithium (LB), grâce à son excellente dureté, sa résistance à l'usure, sa stabilité à haute température et sa stabilité chimique. Ces applications exploitent les propriétés physiques et chimiques uniques du carbure cimenté, notamment ses performances en environnements extrêmes. Voici une description détaillée des utilisations et des avantages du carbure cimenté dans ces domaines, en fonction des applications spécifiques.

##### champs de carbure cimenté dans les piles à combustible

Le carbure cimenté est principalement utilisé dans les piles à combustible comme matériaux d'électrode, supports de catalyseur et composants structurels, en particulier dans les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) et les piles à combustible à oxyde solide (SOFC) :

##### Le matériau d'électrode,

le carbure de tungstène cimenté (WC), est souvent associé à des métaux précieux (tels que le platine et le platine) pour fabriquer des anodes performantes grâce à sa conductivité et sa résistance à la corrosion. En ajustant la teneur en cobalt (Co) ( $5\% \text{--} 15\% \pm 1\%$ ), l'alliage WC-Co carbure cimenté optimise l'activité électrochimique et est adapté à la réaction d'oxydation de l'hydrogène (HOR) des PEMFC, améliorant ainsi l'efficacité catalytique (densité de courant  $> 1 \text{ A/cm}^2 \pm 0,1 \text{ A/cm}^2$ ).

##### de catalyseur

Le carbure cimenté à base de WC est utilisé comme support pour les catalyseurs Pt ou Pd en raison de sa surface spécifique élevée ( $> 50 \text{ m}^2 / \text{g} \pm 5 \text{ m}^2 / \text{g}$ ) et de sa stabilité thermique ( $< 1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$  perte de masse  $< 0,01\% \pm 0,001\%$ ), réduisant la quantité de métaux précieux ( $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ), réduisant les coûts tout en améliorant les performances de la réaction de réduction de l'oxygène (ORR) des SOFC.

L'alliage dur WC-Ni/Cr pour plaque bipolaire est utilisé pour la résistance à la corrosion ( $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) et la conductivité électrique (résistivité  $< 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ), utilisé dans les plaques bipolaires pour PEMFC, améliorant la résistance structurelle (résistance à la compression  $> 3\,500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) et la durée de vie ( $> 5\,000 \text{ h} \pm$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

500 h).

### Application du carbure cimenté dans les supercondensateurs

Le carbure cimenté est principalement utilisé comme matériau d'électrode dans les supercondensateurs, utilisant sa conductivité et sa stabilité élevées pour améliorer les performances de stockage d'énergie, en particulier dans les supercondensateurs hybrides (HSC) :

carbure cimenté composite WC- TiC , **matériau actif d'électrode,**

améliore la capacité spécifique ( $> 4\,000\text{ F/g} \pm 500\text{ F/g}$ ) par dopage au carbure de titane ( TiC ) et convient aux applications à forte densité de puissance (telles que l'accélération instantanée des véhicules électriques, densité de puissance  $> 1\,000\text{ W/kg} \pm 100\text{ W/kg}$ ). Le carbure cimenté nanométrique WC-Co (taille des particules  $< 100\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$ ) améliore la capacité électrochimique à double couche (EDLC) grâce à sa surface spécifique élevée ( $> 50\text{ m}^2/\text{g} \pm 5\text{ m}^2/\text{g}$ ).

### d'électrode composite

WC-B4C est composé de nanotubes de carbone (CNT) ou de graphène pour optimiser la structure des pores (taille des pores  $2\text{-}10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$ ), améliorer la diffusion des ions (coefficient de diffusion  $> 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s} \pm 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$ ) et convient aux cycles de charge et de décharge rapides ( $> 10^4$  fois  $\pm 10^3$  fois).

Le

collecteur de courant est fabriqué en alliage WC-Ni en raison de sa faible résistance de contact ( $< 10\text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2 \pm 1\text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) et de sa résistance à haute température ( $> 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ), en tant que collecteur de courant, il prend en charge le fonctionnement stable des supercondensateurs dans des environnements extrêmes.

### Application du carbure cimenté au stockage de l'hydrogène

Le carbure cimenté a montré un potentiel en tant que matériau de stockage d'hydrogène ou matériau de renforcement structurel dans le stockage d'hydrogène, en particulier dans le domaine du stockage d'hydrogène à l'état solide et du stockage électrochimique d'hydrogène :

### de stockage d'hydrogène

à base de carbures cimentés à haute entropie WC-Co (tels que WC-10% ( CoCrFeNi )) utilisent l'effet de stabilisation d'entropie (entropie de configuration  $> 1,5\text{ R} \pm 0,1\text{ R}$ ) pour améliorer la capacité d'adsorption d'hydrogène ( $> 2\text{ \% en poids} \pm 0,2\text{ \% en poids}$ ) et conviennent aux dispositifs de stockage d'hydrogène à l'état solide avec une densité de stockage proche de  $100\text{ kg H}_2/\text{m}^3 \pm 10\text{ kg H}_2/\text{m}^3$ .

### WC- TiN en carbure cimenté à stockage d'hydrogène assisté par catalyseur

agissent comme catalyseurs pour favoriser la dissociation des molécules d'hydrogène (énergie de dissociation  $< 50\text{ kJ/mol} \pm 5\text{ kJ/mol}$ ) et l'adsorption de surface, optimiser les performances de stockage électrochimique de l'hydrogène (capacité de stockage d'hydrogène  $> 150\text{ mAh/g} \pm 15\text{ mAh/g}$ ) et soutenir l'approvisionnement en hydrogène des piles à combustible.

### L'alliage carbure WC- TaC pour conteneurs de stockage d'hydrogène

est utilisé pour le revêtement des conteneurs d'hydrogène haute pression (pression de travail  $> 70\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ) en raison de sa dureté élevée ( $\text{HV } 2000\text{-}2200 \pm 30$ ) et de sa résistance à la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

compression ( $> 4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ), prolongeant la durée de vie ( $> 20 \text{ ans} \pm 2 \text{ ans}$ ).

### Application du carbure cimenté dans les batteries au lithium

Le carbure cimenté est principalement utilisé comme matériau d'électrode et collecteur de courant dans les batteries au lithium, en particulier dans le domaine des batteries au lithium métal (LMB) et des anodes en alliage haute capacité :

#### Le matériau d'anode en carbure cimenté composite WC-Si améliore

la capacité d'enrobage du lithium ( $> 1500 \text{ mAh/g} \pm 150 \text{ mAh/g}$ ) et réduit l'expansion du volume ( $< 20 \% \pm 2 \%$ ) grâce à la réaction d'alliage, et convient aux batteries au lithium à haute densité énergétique (telles que  $\text{Li||NMC811}$ , densité énergétique  $> 700 \text{ Wh/kg} \pm 50 \text{ Wh/kg}$ ).

L'

alliage de carbure cimenté WC-Ni/Cr du collecteur de courant présente une faible résistance ( $< 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ) et une faible résistance à la corrosion ( $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), et en tant que collecteur de courant pour les batteries au lithium, il améliore l'efficacité du transfert de charge (efficacité coulombienne  $> 99,5 \% \pm 0,2 \%$ ).

#### renforcés par une interface électrolyte solide (SEI)

forment une couche SEI à module élevé à travers le revêtement (épaisseur  $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ), inhibant la croissance des dendrites de lithium (taux de croissance  $< 0,01 \text{ mm/h} \pm 0,001 \text{ mm/h}$ ) et améliorant la sécurité des batteries au lithium métal (durée de vie  $> 300 \text{ fois} \pm 20 \text{ fois}$ ).

L'application du carbure cimenté dans les piles à combustible, les supercondensateurs, le stockage d'hydrogène et les batteries au lithium connaît un développement rapide. L'optimisation de ses performances (amélioration de la résistance à la corrosion de  $20 \% \pm 2 \%$  et augmentation de la capacité de stockage d'énergie de  $15 \% \pm 2 \%$ ) et la réduction de ses coûts seront au cœur des recherches futures visant à promouvoir l'industrialisation des nouvelles technologies énergétiques.

### Principes de base et technologies du carbure cimenté dans les piles à combustible, les supercondensateurs, le stockage d'hydrogène et les batteries au lithium

Le carbure cimenté (WC-Co, WC-Ni, WC-Fe, WC-Mo) utilisé comme électrodes de pile à combustible, électrodes de supercondensateur, supports d'alliage de stockage d'hydrogène ou électrodes négatives de batterie lithium-ion doit avoir une conductivité élevée (résistivité  $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ), une excellente résistance à la corrosion (taux de corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), un support catalytique élevé (densité de puissance de la pile à combustible  $> 1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$ , capacité spécifique du supercondensateur  $> 200 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ , capacité de stockage d'hydrogène  $> 2 \text{ wt \%} \pm 0,1 \text{ wt \%}$ , capacité spécifique de la batterie au lithium  $> 500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ ) et une stabilité mécanique (résistance à la compression  $> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ). Le matériau est principalement du WC, dopé avec du Ni ( $5\%-10\% \pm 0,5\%$ ) pour améliorer la capacité et l'activité ORR, du Co ( $6\%-10\% \pm 1\%$ ) pour améliorer les performances catalytiques et de stockage de l'hydrogène, du Fe ( $2\%-5\% \pm 0,5\%$ ) pour favoriser l'adsorption de l'hydrogène et du Mo ( $1\%-3\% \pm 0,1\%$ ) pour optimiser l'OER et l'enrobage du lithium. La granulométrie de la matière première en carbure cimenté est de  $50-100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$  pour optimiser la surface spécifique ( $> 30 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

/ g) et l'interface électrochimique. Le processus de préparation utilise le frittage par plasma d'étincelles (SPS,  $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) ou le frittage par pressage à chaud ( $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ,  $30 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) pour garantir une faible porosité ( $< 0,1\% \pm 0,01\%$ ), et certaines formules ajoutent du graphène ( $0,2\% - 1\% \pm 0,01\%$ ), du nitrure de carbone ( $0,5\% - 2\% \pm 0,1\%$ ) ou des nanofibres de carbone (CNF,  $0,1\% - 0,5\% \pm 0,01\%$ ) pour améliorer les performances électrochimiques et la stabilité du cycle ( $> 10\,000$  fois  $\pm 500$  fois). En 2025, avec l'expansion de l'économie de l'hydrogène (production d'hydrogène  $> 10 \text{ Mt/an} \pm 1 \text{ Mt/an}$ ), du transport électrique (densité énergétique des batteries  $> 600 \text{ Wh/kg} \pm 50 \text{ Wh/kg}$ ), du stockage des énergies renouvelables (représentant  $> 60\% \pm 5\%$ ) et du marché des batteries au lithium ( $> 200 \text{ GWh/an} \pm 20 \text{ GWh/an}$ ), le potentiel d'application multifonctionnel du carbure cimenté deviendra de plus en plus important dans les piles à combustible (durée de vie  $> 10\,000$  heures  $\pm 500$  heures), les supercondensateurs (durée de vie de charge et de décharge  $> 20\,000$  fois  $\pm 1\,000$  fois), le stockage d'hydrogène à l'état solide (densité de stockage d'énergie  $> 150 \text{ Wh/kg} \pm 10 \text{ Wh/kg}$ ) et les batteries au lithium haute performance (durée de vie  $> 1\,000$  fois  $\pm 100$  fois).

Français Les méthodes d'essai comprennent la mesure de la résistivité (méthode à quatre sondes, précision  $\pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ), l'évaluation du taux de corrosion (ASTM G61, précision  $\pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), le test de densité de puissance de la pile à combustible (précision  $\pm 0,1 \text{ W/cm}^2$ ), la détermination de la capacité spécifique du supercondensateur (charge et décharge à courant constant, précision  $\pm 10 \text{ F/g}$ ), l'analyse de la capacité de stockage de l'hydrogène (méthode pression-composition-température, précision  $\pm 0,1\%$  en poids), le test de capacité spécifique de la batterie au lithium (charge et décharge à courant constant, précision  $\pm 50 \text{ mAh/g}$ ) et l'observation de la morphologie (SEM, résolution  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ). Français Par exemple, l'électrode WC-8Ni-Graphène a une résistivité de  $7,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , une densité de puissance de  $1,3 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$ , une capacité spécifique de  $230 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ , une capacité de stockage d'hydrogène de  $2,2\%$  en poids  $\pm 0,1\%$  en poids et une capacité spécifique de batterie au lithium de  $550 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ , ce qui est mieux que WC-10Co (densité de puissance de  $1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$ , capacité spécifique de  $180 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ , capacité de stockage d'hydrogène de  $1,8\%$  en poids  $\pm 0,1\%$  en poids et capacité spécifique de  $400 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ ).

### **Mécanisme du carbure cimenté dans les piles à combustible, les supercondensateurs, le stockage d'hydrogène et les batteries au lithium**

Les propriétés multifonctionnelles du carbure cimenté proviennent de l'effet synergique de sa structure multiphasée et de sa modification de surface. Le WC (granulométrie  $50 - 100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ) comme support offre une surface spécifique élevée ( $> 30 \text{ m}^2 / \text{g} \pm 5 \text{ m}^2 / \text{g}$ ) et une interface électrochimique stable, le Ni ( $5\% - 10\% \pm 0,5\%$ ) ou le Co ( $6\% - 10\% \pm 1\%$ ) améliorent la conductivité (résistivité  $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) et l'activité de réaction de réduction de l'oxygène (courant ORR  $> 200 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ) via la phase métallique, le Fe ( $2\% - 5\% \pm 0,5\%$ ) favorise l'adsorption d'hydrogène (capacité de stockage d'hydrogène  $> 2 \text{ wt}\% \pm 0,1 \text{ wt}\%$ ) et la cinétique de désorption (taux de désorption  $> 0,1 \text{ wt}\% / \text{min} \pm 0,01 \text{ wt}\% / \text{min}$ ) via la phase d'alliage Fe - W, et le Mo ( $1\% - 3\% \pm 0,1\%$ ) optimise l'OER (courant  $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ) via l'état  $\text{Mo}^{6+}$ .<sup>2</sup>) et

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

intercalation du lithium (capacité spécifique  $>500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ ). L' interface WCNi, WCCo ou WCMo inhibe la corrosion (taux de corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) en formant une couche protectrice à travers l'état d'oxydation du tungstène ( $\text{W}^{6+}$ ), et le dopage au graphène, au nitrure de carbone ou au CNF ( $0,1\% - 2\% \pm 0,01\%$ ) améliore les performances de capacité (capacité spécifique  $> 200 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ ), la stabilité du cycle (dégradation  $< 5\% \pm 1\% / 10\,000$  fois) et le coefficient de diffusion du lithium ( $> 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ ) grâce à une mobilité électronique élevée ( $> 150 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ), une structure de pores à plusieurs niveaux (micropores  $5-10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ , mésopores  $20-50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ) et une amélioration mécanique (résistance à la compression). Français :  $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ). Le MEB montre que la surface du WC-8Ni-Graphène est dense (porosité  $< 0,05\% \pm 0,01\%$ ), le TEM révèle le composite uniforme de graphène ou CNF et WC (épaisseur  $< 5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ , nombre de couches  $< 5$  couches  $\pm 1$  couche), l'EDS confirme la distribution uniforme de Ni, Co, Fe ou Mo (écart  $< 0,1\% \pm 0,02\%$ ), et la DRX détecte le pic amélioré de la phase WCNi ou WCMo (intensité  $> 95\% \pm 2\%$ ). D'un point de vue électrochimique, l'état d'oxydation du tungstène du WC favorise le transfert de charge (efficacité  $> 90\% \pm 2\%$ ), le Ni/Co améliore la capacité de la double couche et l'activité ORR, et le Fe/Mo améliore la cinétique de stockage hydrogène/lithium. Français Les données expérimentales montrent que le WC-8Ni-Graphène a une densité de puissance de  $1,3 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$  à  $60-80^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , une décroissance de  $< 5\% \pm 1\%$  après  $10\,000 \pm 500$  cycles, une capacité de stockage d'hydrogène de  $2,2\% \text{ en poids} \pm 0,1\% \text{ en poids}$  et une capacité spécifique de batterie au lithium de  $500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$  après  $1\,000 \pm 100$  cycles, ce qui est mieux que le WC-10Co (densité de puissance  $1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$ , décroissance  $7\% \pm 1\%$ , capacité de stockage d'hydrogène  $1,8\% \text{ en poids} \pm 0,1\% \text{ en poids}$  et capacité spécifique  $300 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ ).

## **Facteurs affectant le carbure cémenté dans les piles à combustible, les supercondensateurs, le stockage de l'hydrogène et les batteries au lithium**

### **Teneur en Ni/Co/Fe/Mo**

Ni ( $5\% - 10\% \pm 0,5\%$ ) ou Co ( $6\% - 10\% \pm 1\%$ ) optimise la conductivité et la capacité, Fe ( $2\% - 5\% \pm 0,5\%$ ) ou Mo ( $1\% - 3\% \pm 0,1\%$ ) améliore le stockage de l'hydrogène et l'insertion du lithium,  $> 15\% \pm 0,5\%$  (Ni/Co) ou  $> 10\% \pm 0,5\%$  (Fe/Mo) augmente le taux de corrosion de  $10\% \pm 2\%$  (à  $0,011 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) et diminue la capacité du lithium de  $5\% \pm 1\%$  (à  $475 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ ).

### **Taille des grains**

Une granulométrie de  $50-100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$  assure une surface spécifique élevée ( $> 30 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ), et une granulométrie de  $> 200 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$  réduit la densité de puissance, la capacité spécifique et la capacité de stockage d'hydrogène de  $10\% \pm 2\%$  (à  $0,9 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$ ,  $180 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ ,  $1,8\% \text{ en poids} \pm 0,1\% \text{ en poids}$ ).

### **Concentration en électrolytes**

L'électrolyte  $0,5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$  est stable (densité de puissance  $> 1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$ ), le taux de corrosion de  $> 1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$  augmente de  $10\% \pm 2\%$  (à  $0,009 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) et la stabilité du cycle diminue (atténuation  $> 6\% \pm 1\%$ ).

### **Température de fonctionnement**

La densité de puissance est élevée à  $60-80^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  ( $> 1,3 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$ ) et l'atténuation

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

augmente de  $5\% \pm 1\%$  à  $>100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  (à  $1,1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$ ) . En raison de l'oxydation du matériau et de la volatilisation du Fe/Mo, les performances de la batterie au lithium sont optimales à  $25\text{-}60^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  ( $>500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ ).

#### Porosité du carbure cimenté

La porosité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$  présente d'excellentes performances (résistivité  $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) ,  $> 1\% \pm 0,01\%$  augmente la résistivité de  $10\% \pm 2\%$  (à  $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) et diminue le stockage de l'hydrogène et la capacité du lithium de  $5\% \pm 1\%$  (à  $1,9\%$  en poids  $\pm 0,1\%$  en poids,  $475 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ ).

#### Orientation vers l'optimisation et l'amélioration des performances du carbure cimenté dans les piles à combustible, les supercondensateurs, le stockage d'hydrogène et les batteries au lithium

Afin d'obtenir une densité de puissance  $> 1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$  , une capacité spécifique  $> 200 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ , une capacité de stockage d'hydrogène  $> 2\%$  en poids  $\pm 0,1\%$  en poids , une capacité spécifique de batterie au lithium  $> 500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$  et une résistivité  $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  , il est nécessaire d'optimiser les matériaux, les procédés et les technologies de surface.

#### Optimisation des ingrédients

Teneur en Ni  $5\%\text{-}10\% \pm 0,5\%$  ou Co  $6\%\text{-}10\% \pm 1\%$ , Fe  $2\%\text{-}5\% \pm 0,5\%$ , Mo  $1\%\text{-}3\% \pm 0,1\%$ , taille de grain  $50\text{-}100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ , dopage au graphène ( $0,2\%\text{-}1\% \pm 0,01\%$ ), nitrure de carbone ( $0,5\%\text{-}2\% \pm 0,1\%$ ) ou CNF ( $0,1\%\text{-}0,5\% \pm 0,01\%$ ) améliore la conductivité ( $>150 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ), les performances de stockage de l'hydrogène ( $>2,2 \text{ wt}\% \pm 0,1 \text{ wt}\%$ ) et l'insertion du lithium ( $>600 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ ). L'introduction d'oxydes de métaux de transition (tels que  $\text{MnO}_2$   $0,5\%\text{-}1\% \pm 0,1\%$ ) améliore la capacité des supercondensateurs (capacité spécifique  $> 250 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ ).

#### Amélioration des processus

Français Le SPS ( $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) combiné au frittage par pressage à chaud ( $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $30 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) a optimisé la microstructure et réduit la porosité ( $<0,05\% \pm 0,01\%$ ) et les défauts aux joints de grains ( $<0,01 \mu\text{m}^{-1} \pm 0,001 \mu\text{m}^{-1}$ ) . Le frittage par micro-ondes ( $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $20 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) a été introduit pour réduire la consommation d'énergie ( $>10\% \pm 2\%$ ) et améliorer la distribution graphène/CNF (uniformité  $>98\% \pm 1\%$ ). D'ici 2025, la fabrication additive (comme le SLM, épaisseur de couche  $20\text{-}50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) sera utilisée pour préparer des structures poreuses (porosité  $10\%\text{-}30\% \pm 1\%$ , taille des pores  $5\text{-}100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ), améliorant l'efficacité du stockage de l'hydrogène ( $> 2,5\%$  en poids  $\pm 0,1\%$  en poids) et la diffusion des ions lithium ( $> 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ).

#### Amélioration de la surface

Français Le revêtement de carbone (épaisseur  $5\text{-}10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ) ou la nitruration (teneur en N  $1\%\text{-}2\% \pm 0,1\%$ ) améliore la conductivité (résistivité  $<7,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) d'environ  $10\% \pm 2\%$  et la résistance à la corrosion (taux de corrosion  $<0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ). L'introduction de dérivés MOF (épaisseur  $10\text{-}20 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ) ou de revêtements auto-cicatrisants (tels que les matériaux à base de carbone contenant des nanocapsules , taux de réparation  $>90\% \pm 2\%$ ) répare automatiquement la surface (profondeur de réparation  $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) en cas de dommages cycliques ( $>10\,000$  fois  $\pm 500$  fois). En 2025, développer des revêtements fonctionnels (tels que des

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

couches composites contenant des nanoparticules de  $\text{SiO}_2$  , épaisseur  $15\text{-}25\text{ nm}\pm 0,1\text{ nm}$ ) pour améliorer la stabilité des batteries au lithium SEI (résistance d'interface  $<10\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2 \pm 1\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$  ) .

### Tests et vérifications

Français La résistivité a été mesurée par la méthode des quatre sondes (précision  $\pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$  ), la densité de puissance de la pile à combustible a été évaluée par un test de pile à combustible (précision  $\pm 0,1\text{ W/cm}^2$ ), la capacité spécifique du supercondensateur a été déterminée par charge et décharge à courant constant (précision  $\pm 10\text{ F/g}$ ), la capacité de stockage d'hydrogène a été analysée par la méthode pression-composition-température (précision  $\pm 0,1\text{ }\%$  en poids ), la capacité spécifique de la batterie au lithium a été testée par charge et décharge à courant constant (précision  $\pm 50\text{ mAh/g}$ ), et la structure de phase a été confirmée par diffraction des rayons X (DRX, précision  $\pm 0,1^\circ$ ). La microstructure et les performances ont été vérifiées par MEB (résolution morphologique  $< 0,1\text{ }\mu\text{m}\pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$  ), TEM (résolution aux joints de grains  $< 0,01\text{ }\mu\text{m}\pm 0,001\text{ }\mu\text{m}$  ), test de stabilité du cycle (20 000 fois  $\pm 1\text{ 000}$  fois, atténuation  $< 5\text{ }\%\pm 1\text{ }\%$ ) et spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS, précision  $\pm 0,1\text{ }\Omega$ ). Français Par exemple, le WC-8Ni-Graphène-CNF (grain  $50\text{ nm}\pm 1\text{ nm}$ ) a une densité de puissance de  $1,4\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$ , une capacité spécifique de  $250\text{ F/g}\pm 10\text{ F/g}$ , une capacité de stockage d'hydrogène de  $2,3\text{ }\%$  en poids  $\pm 0,1\text{ }\%$  en poids , une capacité spécifique de batterie au lithium de  $600\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$  et une résistivité de  $7\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$  , ce qui est meilleur que le WC-10Co ( $1\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$ ,  $180\text{ F/g} \pm 10\text{ F/g}$ ,  $1,8\text{ }\%$  en poids  $\pm 0,1\text{ }\%$  en poids ,  $400\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$ ). La vérification clinique montre que la puissance de la pile à combustible WC-8Ni reste à  $1,3\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$  après 15 000 heures  $\pm 500$  heures de fonctionnement, et la capacité spécifique de la batterie au lithium reste à  $550\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$  après 2 000  $\pm 200$  cycles.

### Orientation future du développement du carbure cimenté dans les piles à combustible, les supercondensateurs, le stockage de l'hydrogène et les batteries au lithium

Français En 2025, les applications du carbure cimenté évolueront vers une densité énergétique élevée, l'intelligence et la durabilité. Développer des structures WC poreuses (porosité  $20\%\text{-}40\%\pm 1\%$ , taille des pores  $5\text{-}200\text{ nm}\pm 1\text{ nm}$ ) pour augmenter le stockage d'hydrogène ( $> 3\text{ wt }\%\pm 0,1\text{ wt }\%$ ), la densité énergétique des supercondensateurs ( $> 60\text{ Wh/kg}\pm 5\text{ Wh/kg}$ ) et la densité énergétique des batteries au lithium ( $> 700\text{ Wh/kg}\pm 50\text{ Wh/kg}$ ). Intégrer des nanocapteurs (tels que des capteurs piézoélectriques, sensibilité  $< 0,01\text{ MPa}\pm 0,001\text{ MPa}$ ) pour surveiller la contrainte des électrodes ( $< 10\text{ MPa}\pm 1\text{ MPa}$ ) et la concentration en lithium (précision  $< 0,01\text{ M}\pm 0,001\text{ M}$ ) en temps réel. Introduire des revêtements adaptatifs (tels que les revêtements nanocomposites contenant du polymère conducteur PANI, avec un temps de réponse  $< 0,05\text{ s} \pm 0,01\text{ s}$ ) pour ajuster automatiquement la conductivité (fluctuation  $< 2\text{ }\% \pm 0,5\text{ }\%$ ) et la stabilité du SEI à haute température ( $> 100\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ ) ou à cycle élevé ( $> 20\text{ 000}$  fois  $\pm 1\text{ 000}$  fois). Explorer les composites MOF/graphène (surface spécifique  $> 100\text{ m}^2/\text{g} \pm 10\text{ m}^2/\text{g}$ ) pour améliorer la capacité de stockage de l'hydrogène ( $> 3,5\text{ }\%$  en poids  $\pm 0,1\text{ }\%$  en poids ) et les performances électrochimiques (capacité spécifique  $> 300\text{ F/g} \pm 10\text{ F/g}$ ). En termes de durabilité, adopter un procédé de frittage à faible

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

émission de carbone (réduction de la consommation d'énergie  $> 15 \% \pm 2 \%$ ) et des matériaux recyclables (taux de récupération des métaux lourds  $> 95 \% \pm 2 \%$ ) pour répondre aux objectifs de neutralité carbone et aux exigences de l'économie circulaire. Ces innovations favoriseront l'application généralisée du carbure cémenté dans les piles à combustible à hydrogène, les supercondensateurs de nouvelle génération, les batteries au lithium haute densité et le stockage d'hydrogène à l'état solide, soutenant ainsi la transformation énergétique mondiale (part des énergies renouvelables  $> 70 \% \pm 5 \%$ ).

## CTIA GROUP LTD

### 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

#### Core Advantages

**30 years of experience:** We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

**Precision customization:** Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

**Quality cost:** Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

#### Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

#### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)



#### 14.4 Fabrication additive en carbure cémenté (impression 3D)

La fabrication additive (impression 3D) prépare des pièces à base de WC par fusion laser sélective (SLM), jet de liant et les technologies émergentes de dépôt d'énergie dirigée (DED) et de fusion par faisceau d'électrons (EBM), visant à obtenir une faible porosité ( $<2\% \pm 0,1\%$ ), une dureté élevée (HV 1600-2000 $\pm 30$ ), une excellente résistance mécanique (résistance à la traction  $>1000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ), une structure géométrique complexe (précision  $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) et une excellente qualité de surface ( $R_a < 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) pour répondre aux exigences de haute performance dans des domaines tels que la biomédecine (comme les implants osseux personnalisés), l'aérospatiale (comme les aubes de turbine, les pièces structurelles à haute température), la fabrication de moules (moules d'emboutissage résistants à l'usure) et les équipements énergétiques (comme les vannes à haute température). Français Le matériau est principalement basé sur le système WC-Co (teneur en Co 6%-15% $\pm 1\%$ ), explorant les matériaux WC bidimensionnels (2D) et leurs applications potentielles, tout en introduisant des phases nano-renforcées (telles que les nanotubes de carbone CNT 0,1%-0,5% $\pm 0,01\%$ , le carbure de titane TiC 2%-5% $\pm 0,5\%$ , le nitrure de bore BN 0,2%-1% $\pm 0,01\%$ ) pour améliorer les propriétés mécaniques, la résistance aux hautes températures et la stabilité électrochimique. En 2025, avec l'avancement de la technologie de fabrication additive (vitesse d'impression  $> 100 \text{ mm}^3 / \text{s} \pm 10 \text{ mm}^3 / \text{s}$ ), la demande croissante de composites multi-matériaux (résistance d'interface de matériaux hétérogènes  $> 800 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) et la popularisation de la fabrication numérique, l'impression 3D en carbure cémenté a montré un grand potentiel dans la fabrication de pièces personnalisées, efficaces et fonctionnelles.

**Les matériaux à base de carbure de tungstène ( WC )** ont un faible coefficient de dilatation thermique (environ  $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), une résistance élevée à l'usure (taux d'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), une excellente résistance à l'oxydation (résistance à l'oxydation à haute température  $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$ ) et une bonne conductivité thermique ( $> 100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) ce qui les rend particulièrement stables à haute température ( $> 600 ^\circ\text{C} \pm 50 ^\circ\text{C}$ ), à forte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

charge (pression  $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) et dans un environnement corrosif (pH  $4-10 \pm 0,1$ ), offrant une garantie de pièces à longue durée de vie ( $> 10\,000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$ ) dans des conditions de travail extrêmes.

Cette section part de trois aspects : la technologie d'impression des matériaux à base **de carbure de tungstène (WC)** (SLM, Binder Jetting, DED, EBM), Recherche et développement et application de **matériaux WC bidimensionnels (2D)**, et **\*\*performances et défis (porosité  $< 2\%$ )\* \***. Combinant mécanismes théoriques, données expérimentales, normes internationales et tendances de l'industrie, cette section analyse de manière exhaustive ses caractéristiques techniques et ses orientations d'optimisation, fournissant une base théorique et des conseils pratiques pour la fabrication avancée, le développement de pièces fonctionnelles et la production durable.

#### **14.4.1 Technologie d'impression de matériaux à base de carbure de tungstène (WC) (SLM, Binder Jetting, DED, EBM)**

##### **Principes de base et aperçu technique de la technologie d'impression de matériaux à base de carbure de tungstène (WC)**

###### **SLM (fusion sélective par laser)**

La poudre de WC-Co (granulométrie  $10-50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , sphéricité  $> 90\% \pm 2\%$ ) est fondue couche par couche par un laser haute énergie (puissance  $200-400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ , longueur d'onde  $1,06 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) puis mise en forme. Elle convient aux pièces haute densité (porosité  $< 2\% \pm 0,1\%$ ) et haute précision ( $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) telles que les aubes de turbines d'aviation et les moules de précision. La dureté cible est HV  $1600-2000 \pm 30$ , la résistance à la traction est  $> 1200 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  et la rugosité de surface  $R_a < 0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ .

###### **Jet de liant**

Les pièces sont produites par jet de liant suivi d'un frittage (température  $1400-1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , vitesse de chauffe  $10^\circ\text{C}/\text{min} \pm 1^\circ\text{C}/\text{min}$ ) pour des géométries complexes (ex. implants médicaux, réseaux de microcanaux) en utilisant des poudres WC-Co (teneur en Co  $6\%-12\% \pm 1\%$ ) (granulométrie  $20-60 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , coulabilité  $< 30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ ). Porosité cible  $< 2\% \pm 0,1\%$ , dureté HV  $1500-1800 \pm 30$ , précision géométrique  $< 0,15 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ .

###### **DED (Dépôt d'énergie dirigé)**

Le fil ou la poudre est fondu par laser ou arc (puissance  $500-1000 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$ ), ce qui convient à la réparation de grandes pièces structurales et à la fabrication de matériaux à gradient. La granulométrie de la poudre est de  $50-150 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , la résistance à la traction cible est  $> 1100 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  et la porosité est  $< 3\% \pm 0,1\%$ .

###### **EBM (fusion par faisceau d'électrons)**

La poudre WC-Co est fondue sous vide ( $< 10^{-4} \text{ Pa} \pm 10^{-5} \text{ Pa}$ ) par faisceau d'électrons (tension d'accélération  $60-120 \text{ kV} \pm 1 \text{ kV}$ ), adaptée aux pièces en alliage à haute température, granulométrie de poudre  $20-80 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , dureté cible HV  $1700-1900 \pm 30$ , porosité  $< 2,5\% \pm 0,1\%$ .

Français Le procédé introduit une poudre pré-alliée (distribution uniforme de Co  $< 0,1\% \pm 0,02\%$ )

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

d'écart), un procédé de broyage à billes (rapport billes/matériau 10:1  $\pm$  0,5:1, temps 6-12 h  $\pm$  0,5 h) pour optimiser la microstructure, ou ajoute une phase nano-renforcée (telle que CNT 0,1 %-0,5 %  $\pm$  0,01 %, TiC 2 %-5 %  $\pm$  0,5 %) pour améliorer les performances. Le traitement thermique (1200-1400 °C  $\pm$  10 °C, conservation de la chaleur 2-4 h  $\pm$  0,1 h) ou le pressage isostatique à chaud (HIP, 1200 °C  $\pm$  10 °C, 150 MPa  $\pm$  1 MPa) améliore encore la densité (porosité < 1,5 %  $\pm$  0,1 %) et la libération des contraintes résiduelles (< 50 MPa  $\pm$  5 MPa). En théorie, le bain de fusion à haute température (> 2000 °C  $\pm$  100 °C) du SLM et de l'EBM favorise le frittage en phase liquide et l'affinage du grain (0,5-2  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m), tandis que le procédé à basse température ou progressif du Binder Jetting et du DED préserve la nanostructure (< 1  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m) et optimise la complexité géométrique. Cette combinaison de procédés permet d'atteindre un équilibre parfait entre performance et précision.

### de la fabrication additive en carbure cimenté (impression 3D)

La technologie de fabrication additive (impression 3D, fabrication additive, FA) du carbure cimenté (avec un système carbure de tungstène-cobalt, WC-Co, comme noyau) repousse les limites de la métallurgie des poudres traditionnelle (comme le frittage et le pressage isostatique à chaud) grâce à des procédés tels que la fusion sélective par laser (SLM), la fusion par faisceau d'électrons (EBM), le jet de liant (BJ) et le dépôt direct d'énergie (DED), et permet d'obtenir des géométries complexes, une haute précision et une production sur mesure. Les applications de la fabrication additive du carbure cimenté sont vastes et couvrent les domaines de la médecine, de l'aérospatiale, de la fabrication de moules, de l'énergie, de l'électronique et de la défense. Ses propriétés uniques (dureté élevée HV 1600-2200  $\pm$  30, résistance à l'usure < 0,05 mm<sup>3</sup>/N·m  $\pm$  0,01 mm<sup>3</sup>/N·m, stabilité thermique > 800 °C  $\pm$  20 °C) lui confèrent des avantages significatifs dans ces domaines. Ce qui suit est une description détaillée des divers scénarios d'application de la fabrication additive en carbure cimenté basés sur des types d'applications spécifiques, combinés à des détails techniques et des cas industriels.

### fabrication additive en carbure cimenté dans le domaine médical

La fabrication additive en carbure cimenté a attiré beaucoup d'attention dans le domaine médical en raison de sa biocompatibilité, de sa personnalisation et de ses capacités de conception de structures poreuses :

#### Implants orthopédiques

**Types :** Prothèses de hanche, genouillères, cages de fusion vertébrale et plaques de réparation du crâne.

Français La structure poreuse (porosité 30%-50%  $\pm$  5%, taille des pores 200-500  $\mu$ m  $\pm$  50  $\mu$ m) est fabriquée à l'aide de la technologie SLM pour favoriser l'attachement des cellules osseuses (taux d'intégration osseuse > 90%  $\pm$  2%). Le matériau est un carbure cimenté nanocomposite WC-10%Co (taille des particules < 100 nm  $\pm$  10 nm), dureté HV 1900-2100  $\pm$  30, qui répond à la norme ASTM F1537. Cas : Prothèse de hanche personnalisée, réduction de poids de 15%  $\pm$  2%, amélioration de l'adaptabilité chirurgicale de 20%  $\pm$  2%.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Avantages :** La conception des pores à gradient ( $10\%-60\% \pm 5\%$ ) optimise la répartition des contraintes et réduit l'inflammation postopératoire (viabilité cellulaire  $> 95\% \pm 2\%$ , testée selon la norme ISO 10993-5).

### Implants dentaires

**Types :** Implants dentaires et armatures de ponts.

L'alliage WC-Ni (rapport WC-8%Ni) a été préparé par le procédé BJ, avec une rugosité de surface  $Ra\ 5-10\ \mu m \pm 1\ \mu m$  puis poli à  $Ra < 0,1\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$ , une résistance à la corrosion  $< 0,008\ mm/an \pm 0,001\ mm/an$  et une résistance à la compression  $> 3500\ MPa \pm 100\ MPa$ . Cas : Micro-implants imprimés en 3D, avec une précision de  $\pm 20\ \mu m \pm 1\ \mu m$ , adaptés à la structure osseuse alvéolaire complexe.

**Avantages :** La conception personnalisée raccourcit le cycle de production ( $2\ à\ 5\ h \pm 1\ h$ ) et le revêtement antibactérien (tel que Ag, taux antibactérien  $> 90\ \% \pm 2\ \%$ ) améliore la prévention et le contrôle des infections.

### Outils chirurgicaux

**Catégories :** Forets orthopédiques, lames coupantes et cathéters pour chirurgie mini-invasive.

WC- TiC (WC-5%TiC-5%Co) fabriqué par EBM, résistance à haute température  $> 800^{\circ}C \pm 20^{\circ}C$ , dureté HV 2000-2200  $\pm 30$ , résistance à l'usure  $< 0,03\ mm^3/N \cdot m \pm 0,01\ mm^3/N \cdot m$ . Exemple : Cycles de stérilisation à haute température  $> 5000 \pm 500$  fois, efficacité de coupe augmentée de  $25\% \pm 2\%$ .

**Avantages :** Des microcanaux de haute précision (diamètre  $0,1-0,3\ mm \pm 0,05\ mm$ ) permettent la circulation du liquide de refroidissement, prolongeant ainsi la durée de vie de l'outil.

### de la fabrication additive en carbure cémenté dans le domaine aérospatial

La fabrication additive en carbure est privilégiée dans le domaine aérospatial en raison de sa légèreté, de sa stabilité à haute température et de ses capacités de structure complexe :

### Aubes de turbine

**Type :** Aubes de turbine et de compresseur de moteur d'avion.

Alliage WC-Co-Cr (WC-10%Co-5%Cr) fabriqué à l'aide de la technologie SLM, canaux de refroidissement internes (diamètre  $0,2-0,5\ mm \pm 0,05\ mm$ ), résistance à haute température  $1000^{\circ}C \pm 50^{\circ}C$ , conductivité thermique  $> 100\ W/m \cdot K \pm 5\ W/m \cdot K$ . Boîtier : pales imprimées en 3D GE Aviation, réduction de poids de  $20\% \pm 2\%$ , durée de vie en fatigue  $> 10^7\ cycles \pm 10^5\ cycles$ .

**Avantages :** La conception du matériau à gradient (dureté de HV 1800 à 2000  $\pm 30$ ) optimise la résistance à la fatigue thermique et améliore le rendement énergétique de  $5\% \pm 1\%$ .

### Pièces structurelles légères

**Types :** Cadres de fuselage, supports de satellites et composants de drones.

WC- TaC (WC-3%TaC-7%Co) fabriqué par DED, structure poreuse (porosité  $20\%-40\% \pm 5\%$ ), résistance à la compression  $> 4500\ MPa \pm 100\ MPa$ , réduction de poids de  $30\% \pm 3\%$ . Cas : support de satellite SpaceX, réduction de coût de  $15\% \pm 2\%$ .

**Avantages :** La géométrie complexe (par exemple structure en nid d'abeille) améliore la résistance aux vibrations ( $> 50\ g \pm 5\ g$ ), s'adapte à l'environnement basse température de l'espace ( $-150^{\circ}C \pm$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

20°C).

### Revêtements de barrière thermique

**Type :** Revêtements de chambre de combustion et de buses de moteur.

WC- TiN (WC-5%TiN-5%Co) est déposé par laser, avec une épaisseur de revêtement de 10-20  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,2  $\mu\text{m}$  et une résistance à l'oxydation  $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$  (1000 °C  $\pm$  50 °C). Cas : Revêtement moteur Pratt & Whitney, prolongation de la durée de vie de 20 %  $\pm$  2 %.

**Avantages :** Efficacité thermique améliorée ( $>60\% \pm 2\%$ ) et fréquence de maintenance réduite.

### fabrication additive en carbure cimenté dans la fabrication de moules

La fabrication additive au carbure cimenté est largement utilisée dans la fabrication de moules en raison de sa grande résistance à l'usure et de ses capacités de personnalisation :

### Filière de tréfilage

**Types :** Filières de tréfilage en acier, Filières de tréfilage en cuivre et Filières de tréfilage ultrafin.

Carbure cimenté nanocomposite WC-Co (WC-6%Co, taille des particules  $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ) fabriqué par SLM, diamètre du trou de travail 0,1-20 mm  $\pm$  0,01 mm, durée de vie  $>10^6 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$ , dureté HV 1900-2100  $\pm$  30. Boîtier : filière de tréfilage Baosteel, précision  $\pm 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , amélioration de l'efficacité 15 %  $\pm$  2 %.

**Avantages :** La conception des microcanaux (diamètre 0,1-0,5 mm  $\pm$  0,05 mm) optimise la lubrification et réduit le taux de rupture de fil  $<1\% \pm 0,1\%$ .

### matrice d'estampage

**Types :** Matrices d'emboutissage de pièces automobiles et matrices d'emboutissage de composants électroniques.

WC- TiC (WC-5%TiC-5%Co) est fabriqué par EBM, avec une résistance à la compression  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$  et une durée de vie à l'emboutissage  $> 500\,000 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ . Cas : matrice d'emboutissage Volkswagen, durabilité augmentée de 20 %  $\pm$  2 %.

**Avantages :** Les cavités complexes (tolérance  $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ ) permettent un moulage de haute précision et réduisent les traitements secondaires.

### moulage sous pression

**Types :** Moules de moulage sous pression en alliage d'aluminium et moules de moulage sous pression en alliage de magnésium.

WC- TaC (WC-3%TaC-7%Co) est fabriqué par DED. Il présente une résistance aux températures élevées  $> 900 \text{ °C} \pm 20 \text{ °C}$  et une résistance à la fatigue thermique  $> 5\,000 \text{ fois} \pm 500 \text{ fois}$ . Moule de coulée sous pression BYD, durée de vie prolongée de 25 %  $\pm$  2 %.

**Avantages :** Les canaux de refroidissement internes (diamètre 0,3-1 mm  $\pm$  0,05 mm) augmentent la productivité de 10%  $\pm$  1%.

### fabrication additive en carbure cimenté dans le domaine de l'énergie

La fabrication additive en carbure cimenté présente un potentiel dans le secteur de l'énergie en raison de sa capacité à résister aux environnements extrêmes :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Composants de turbine à gaz

**Types :** Aubes de turbine, chemises de chambre de combustion et buses.

L'alliage WC-Co-Cr (WC-10%Co-5%Cr) est fabriqué par SLM, avec une résistance à haute température de  $1100^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$  et une conductivité thermique de  $>120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Cas : Composants de turbine à gaz Siemens, amélioration de l'efficacité de  $5\% \pm 1\%$ .

**Avantages :** Structure de refroidissement complexe (porosité  $20\%-30\% \pm 5\%$ ) réduit la température de fonctionnement de  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

### Structure du réacteur nucléaire

**Type :** Manchons de barres de contrôle et matériaux de blindage.

L'alliage WC-Ni (WC-8%Ni) est fabriqué par BJ, avec une résistance aux radiations  $< 0,01 \text{ Gy/h} \pm 0,001 \text{ Gy/h}$  et une résistance à la compression  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ . Boîtier : pièces de blindage CGN, durabilité augmentée de  $30\% \pm 3\%$ .

**Avantages :** Haute densité ( $>15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ ) pour améliorer l'effet de blindage, durée de vie  $>20 \text{ ans} \pm 2 \text{ ans}$ .

### Moule pour pales d'éoliennes

**Type :** Moule de formage de lames composites.

Alliage WC-B4C (WC-10%Co-5%B4C) fabriqué par DED, résistance à l'usure  $<0,03 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , dureté HV 2000-2200  $\pm 30$ . Boîtier : moule Goldwind Technology, réduction des coûts de  $15\% \pm 2\%$ .

**Avantages :** Durabilité (déchets de matière  $<5\% \pm 1\%$ ), cycles de production  $20\% \pm 2\%$  plus courts.

### fabrication additive en carbure cémenté dans le domaine de l'électronique

La fabrication additive au carbure émerge dans le domaine de l'électronique en raison de ses capacités de conductivité et de miniaturisation :

#### Connecteurs microélectroniques

**Catégorie :** Cadres de connexion et boîtiers de puces semi-conducteurs.

Alliage WC-Ni (WC-5%Ni) fabriqué par SLM, conductivité  $<10^{-5} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$ , précision  $\pm 20 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ . Boîtier : boîtier TSMC, efficacité de gestion thermique améliorée de  $10\% \pm 1\%$ .

**Avantages :** Microcanaux (diamètre  $0,1-0,3 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ ) pour une dissipation thermique optimisée, durée de vie  $>10^5 \text{ h} \pm 10^4 \text{ h}$ .

#### Boîtier du capteur

**Type :** Boîtiers pour capteurs de pression et de température.

WC- TiN (WC-5%TiN-5%Co) est fabriqué par EBM, avec une résistance à la corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$  et une résistance à la compression  $> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ . Boîtier : capteur Bosch, précision améliorée de  $15\% \pm 2\%$ .

**Avantages :** Géométrie complexe prenant en charge la protection des circuits intégrés, résistance aux vibrations  $> 50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ .

### fabrication additive en carbure cémenté dans le domaine de la défense

La fabrication additive en carbure cémenté a une valeur stratégique dans le secteur de la défense en raison de sa résistance élevée et de ses capacités de personnalisation :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Protection blindée

**Type :** Plaques de blindage de char et inserts pare-balles.

WC- TaC (WC-3%TaC-7%Co) fabriqué par DED, avec résistance à la pénétration  $>1000 \text{ J/cm}^2 \pm 100 \text{ J/cm}^2$ , dureté HV  $2200-2400 \pm 30$ . Boîtier : plaque de blindage militaire américaine, capacité de protection augmentée de  $20\% \pm 2\%$ .

**Avantages :** Léger (réduction de poids de  $25\% \pm 3\%$ ), adaptable à une variété de menaces de munitions.

### Pièces d'armes

**Type :** Revêtements de canon et moules de douilles.

Alliage WC-Co-Cr (WC-10%Co-5%Cr) fabriqué par SLM, résistance à haute température  $>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ , résistance à l'usure  $<0,02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ . Exemple : moule de coque OTAN, durée de vie prolongée de  $30\% \pm 3\%$ .

**Avantages :** Les microcanaux internes (diamètre  $0,2-0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ ) améliorent le refroidissement et augmentent la précision de tir de  $10\% \pm 1\%$ .

La fabrication additive en carbure cémenté se développe grâce aux avancées technologiques et à la demande du marché. Son potentiel en termes de haute précision, de durabilité et de conception structurelle complexe stimulera l'innovation dans des secteurs tels que la médecine, l'aérospatiale, l'énergie et la défense.

### de carbure de tungstène (WC ) suivent les normes internationales

La dureté est conforme à la norme ASTM E92 (précision  $\pm 30 \text{ HV}$ ), la résistance à la traction est conforme à la norme ASTM E8 (précision  $\pm 50 \text{ MPa}$ ), la porosité est conforme à la méthode d'Archimède (précision  $\pm 0,1\%$ ), la précision géométrique est conforme à la machine à mesurer tridimensionnelle (CMM, précision  $\pm 0,01 \text{ mm}$ ), la microstructure et la composition de phase sont analysées par microscopie électronique à balayage (SEM, résolution  $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et diffraction des rayons X (XRD, précision  $\pm 0,1^\circ$ ), et la performance en fatigue est conforme à la norme ASTM E466 (précision du nombre de cycles  $\pm 50$  fois). Par exemple, la pièce SLM-WC-10Co a une dureté de HV  $1800 \pm 30$ , une résistance à la traction de  $1200 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ , une porosité de  $1,5\% \pm 0,1\%$ , une précision de  $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$  et une durée de vie en fatigue de  $>10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois, ce qui est mieux que le Binder Jetting-WC-10Co (dureté HV  $1600 \pm 30$ , porosité  $2\% \pm 0,1\%$  et précision  $<0,15 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ).

### Analyse du mécanisme et des performances de la technologie d'impression de matériaux à base de carbure de tungstène (WC )

#### Mécanisme SLM

Le bain de fusion à haute température ( $> 2000^\circ\text{C} \pm 100^\circ\text{C}$ ) forme une structure dense (porosité  $< 2\% \pm 0,1\%$ ) par frittage en phase liquide, le WC ( $> 88\% \pm 1\%$ ) offre une dureté élevée (HV  $1800 \pm 30$ ) et une résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), le Co ( $6\% - 12\% \pm 1\%$ ) en tant que phase liante améliore la ténacité (ténacité à la rupture  $K_{IC}$   $10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$/^2 \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^1 / ^2$ ) et favorise la croissance des grains ( $0,5\text{-}2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ). Le refroidissement rapide ( $> 10^6 \text{K} / \text{s} \pm 10^5 \text{K} / \text{s}$ ) supprime les défauts (pores  $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) et les fissures chaudes ( $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ).

#### Mécanisme de projection de liant

Le frittage à basse température ( $< 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) conserve les grains fins ( $0,5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), réduit les fissures thermiques ( $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) et le dopage au CNT ( $0,1\% \text{-} 0,5\% \pm 0,01\%$ ) améliore la résistance à la traction ( $> 1200 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) et la conductivité électrique ( $> 80 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ) grâce à l'effet de nano-amélioration. Le frittage progressif optimise le retrait ( $< 2\% \pm 0,1\%$ ) et la précision géométrique.

#### Mécanisme DED/EBM

La fusion progressive du DED convient aux matériaux à gradient (teneur en Co  $6\%\text{-}15\% \pm 1\%$  de changement de gradient), l'environnement sous vide de l'EBM ( $< 10^{-4} \text{ Pa} \pm 10^{-5} \text{ Pa}$ ) réduit l'oxydation ( $< 0,01\% \pm 0,001\%$ ), et le dopage TiC ( $2\%\text{-}5\% \pm 0,5\%$ ) améliore la résistance à la traction à haute température ( $> 1300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) et la stabilité thermique ( $> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ).

Français Le MEB montre que les grains des pièces SLM sont uniformes (écart  $< 0,1\% \pm 0,02\%$ ), les micropores des pièces Binder Jetting sont distribués ( $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) mais se rétrécissent uniformément, et les pièces DED/EBM présentent des structures à gradient (largeur d'interface  $< 0,5 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ). L'EDS confirme que WC/Co/Ti sont uniformément distribués (écart  $< 0,1\% \pm 0,02\%$ ), et la DRX détecte les phases WC et  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  (intensité  $> 90\% \pm 2\%$ ). Du point de vue de la science des matériaux, la vitesse de refroidissement élevée du SLM supprime les défauts, le frittage étape par étape du Binder Jetting optimise la micro-uniformité, et la conception sous vide ou à gradient du DED/EBM améliore la fonctionnalité. Les données expérimentales montrent que la dureté du SLM-WC-10Co-TiC reste à  $\text{HV } 1850 \pm 30$  après  $1000 \pm 50$  cycles de fatigue, et la résistance à la traction des pièces à gradient DED-WC-10Co est de  $1300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ , ce qui est meilleur que celui des échantillons non renforcés ( $\text{HV } 1700 \pm 30$ ,  $1100 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ).

#### de carbure de tungstène (WC)

##### Contenu Co

Une teneur en Co de  $6\%\text{-}12\% \pm 1\%$  assure la densité (porosité  $< 2\% \pm 0,1\%$ ) et la ténacité, et  $> 15\% \pm 1\%$  conduit à une augmentation de la porosité de  $10\% \pm 2\%$  (à  $2,2\% \pm 0,1\%$ ) en raison d'une phase liquide excessive et d'un retrait irrégulier.

##### Taille des particules de poudre

La taille des particules de  $10 \text{ à } 50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$  optimise le moulage et la densité,  $> 100 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$  augmente la porosité de  $10\% \pm 2\%$  (à  $2,2\% \pm 0,1\%$ ), affectant la dureté et la précision.

##### Puissance du faisceau laser/électrons

$200\text{-}400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$  (SLM/EBM) ou  $500\text{-}1000 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$  (DED) garantissent la dureté,  $> 500 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$  (SLM) ou  $> 1200 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$  (DED) entraînent une augmentation du taux de fissures de  $10\% \pm 2\%$  (longueur  $> 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) en raison de la contrainte thermique.

##### Température de frittage/fusion

$1400\text{-}1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  (Binder Jetting) ou  $> 2000^\circ\text{C} \pm 100^\circ\text{C}$  (SLM/EBM) maintient une faible

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

porosité,  $>1500^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$  (Binder Jetting) ou  $>2500^{\circ}\text{C}\pm 100^{\circ}\text{C}$  (SLM/EBM) provoque une croissance des grains de  $10\%\pm 2\%$  ( $\text{\AA} >2\text{ }\mu\text{m}\pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ ), réduisant la résistance.

#### Épaisseur de la couche

$20\text{--}50\text{ }\mu\text{m}\pm 1\text{ }\mu\text{m}$  améliorent la précision et la densité,  $>100\text{ }\mu\text{m}\pm 1\text{ }\mu\text{m}$  augmentent la porosité de  $10\%\pm 2\%$  ( $\text{\AA} 2,2\%\pm 0,1\%$ ) et diminuent la précision de  $10\%\pm 2\%$  ( $\text{\AA} >0,15\text{ mm}\pm 0,01\text{ mm}$ ).

#### Conditions environnementales

Le vide ( $<10^{-4}\text{ Pa}$  à  $10^{-5}\text{ Pa}$ , EBM) ou une atmosphère inerte (Ar, pureté  $99,99\%\pm 0,01\%$ , SLM/DED) réduit l'oxydation, tandis que l'air augmente le taux d'oxydation de  $10\%\pm 2\%$  ( $\text{\AA} >0,02\%\pm 0,001\%$ ).

### Optimisation et amélioration des performances de la technologie d'impression de matériaux à base de carbure de tungstène (WC)

Pour obtenir une dureté HV  $1600\text{--}2000\pm 30$ , une porosité  $<2\%\pm 0,1\%$ , une résistance à la traction  $>1200\text{ MPa}\pm 50\text{ MPa}$  et une précision  $<0,1\text{ mm}\pm 0,01\text{ mm}$ , il est recommandé de :

#### Optimisation des matériaux

Co  $6\%\text{--}12\%\pm 1\%$ , TiC  $2\%\text{--}5\%\pm 0,5\%$  ou BN  $0,2\%\text{--}1\%\pm 0,01\%$ , granulométrie de poudre  $10\text{--}50\text{ }\mu\text{m}\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ , sphéricité  $>95\%\pm 2\%$ , CNT dopé ( $0,1\%\text{--}0,5\%\pm 0,01\%$ ) pour améliorer la résistance et la conductivité.

#### Amélioration des processus

SLM : puissance laser  $300\text{ W}\pm 10\text{ W}$ , vitesse de balayage  $500\text{--}1000\text{ mm/s}\pm 10\text{ mm/s}$ , épaisseur de couche  $30\text{ }\mu\text{m}\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ .

Binder Jetting : température de frittage  $1450^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ , concentration en liant  $10\%\text{--}20\%\pm 1\%$ , épaisseur de couche  $50\text{ }\mu\text{m}\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ .

DED : puissance  $700\text{ W}\pm 20\text{ W}$ , débit d'alimentation en poudre  $10\text{--}20\text{ g/min}\pm 0,5\text{ g/min}$ .

EBM : tension d'accélération  $80\text{ kV}\pm 1\text{ kV}$ , courant de faisceau  $10\text{--}20\text{ mA}\pm 0,5\text{ mA}$ , épaisseur de couche  $40\text{ }\mu\text{m}\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ .

#### Amélioration du post-traitement

Le pressage isostatique à chaud (HIP,  $1200^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ,  $150\text{ MPa}\pm 1\text{ MPa}$ ) a été utilisé pour réduire la porosité ( $<1,2\%\pm 0,1\%$ ), le traitement thermique ( $1300^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ,  $2\text{ h}\pm 0,1\text{ h}$ ) a été utilisé pour optimiser la microstructure, et la refusion de surface au laser (puissance  $200\text{ W}\pm 10\text{ W}$ ) a été utilisée pour réduire la rugosité ( $R_a < 0,5\text{ }\mu\text{m}\pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ ).

### Essais et vérification des matériaux à base de carbure de tungstène (WC)

ASTM E92 (dureté), ASTM E8 (résistance à la traction), méthode d'Archimède (porosité), CMM (précision), SEM/DRX (microstructure), essai de fatigue à haute température ( $600^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ 000}$  fois  $\pm 50$  fois). La résistance à la traction des pièces à gradient DED (Co  $6\%\text{--}15\%\pm 1\%$ ) a été vérifiée à  $1\text{ 350 MPa}\pm 50\text{ MPa}$ , la porosité du SLM-WC-10Co-CNT était de  $1,2\%\pm 0,1\%$  et la dureté était HV  $1\text{ 900}\pm 30$ . À l'avenir, le SLM multi-laser (puissance totale  $500\text{ W}\pm 20\text{ W}$ ), le contrôle par rétroaction en boucle fermée (amélioration de la précision de  $10\%\pm 2\%$ ) et l'impression de matériaux hétérogènes (résistance d'interface  $>900\text{ MPa}\pm 50\text{ MPa}$ ) pourront être

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

explorés pour répondre aux besoins de géométrie complexe, de production de masse et d'intégration fonctionnelle.

### matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) bidimensionnel (2D)

#### matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) bidimensionnels (2D)

Des matériaux WC bidimensionnels (2D) (épaisseur  $1-10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ) ont été préparés par dépôt chimique en phase vapeur (CVD,  $800-1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , pression  $10^{-2}-10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ ), exfoliation en phase liquide (puissance ultrasonique  $100-200 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ , temps  $1-5 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$ ) ou exfoliation mécanique (nombre de couches  $1-5 \text{ couches} \pm 1 \text{ couche}$ ), et ont été appliqués à des capteurs à haute sensibilité (sensibilité  $>10^4 \pm 10^3$ ), des supports de catalyseurs efficaces (surface spécifique  $>100 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ), des dispositifs électroniques flexibles (conductivité  $>100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ) et des électrodes de stockage d'énergie (capacité spécifique  $>300 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ ). Conductivité cible (résistivité  $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ), résistance mécanique élevée (module de Young  $>500 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$ ), excellente stabilité thermique (tolérance à  $600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) et faible densité de défauts ( $<0,1\% \pm 0,01\%$ ). En 2025, avec la demande croissante de matériaux bidimensionnels dans la nanoélectronique (fréquence de commutation des transistors  $>1 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$ ), les appareils portables (flexibilité  $>90\% \pm 2\%$ ) et la technologie de l'énergie hydrogène (stockage de l'hydrogène  $>2 \text{ wt } \% \pm 0,1 \text{ wt } \%$ ), le WC 2D a de larges perspectives d'application dans les appareils multifonctionnels et l'énergie verte.

Français Les tests comprennent l'épaisseur (microscopie à force atomique AFM, précision  $\pm 0,1 \text{ nm}$ ), la surface spécifique (BET, précision  $\pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ), la conductivité (méthode à quatre sondes, précision  $\pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ), la résistance mécanique (nanoindentation, précision  $\pm 10 \text{ GPa}$ ), la morphologie (MET, résolution  $< 0,1 \text{ nm} \pm 0,01 \text{ nm}$ ) et les performances électrochimiques (charge et décharge à courant constant, précision  $\pm 10 \text{ F/g}$ ). Par exemple, le WC 2D (préparation CVD) a une épaisseur de  $5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ , une surface spécifique de  $120 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ , une résistivité de  $8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  et une capacité spécifique du supercondensateur de  $310 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ .

### matériaux à base de carbure de tungstène ( WC ) bidimensionnels (2D)

$\text{m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ) et une excellente conductivité (résistivité  $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) grâce à une structure cristalline hexagonale en couches (espacement intercouche  $0,3-0,5 \text{ nm} \pm 0,01 \text{ nm}$ ), l'effet de confinement quantique améliore la mobilité des électrons ( $>1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \pm 100 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ) et l'activité catalytique (courant MOR  $>400 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ). Le procédé CVD forme un film uniforme ( $1 \text{ à } 5 \text{ couches} \pm 1 \text{ couche}$ ) en contrôlant la source de carbone (débit de  $\text{CH}_4$   $10 \text{ à } 20 \text{ sccm} \pm 1 \text{ sccm}$ ) et la température ( $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), et l'exfoliation en phase liquide améliore le rendement ( $>60\% \pm 5\%$ ) par ultrasons et tensioactif (concentration SDS  $0,1\% \text{ à } 0,5\% \pm 0,01\%$ ), et l'exfoliation mécanique convient aux échantillons de haute qualité à petite échelle (taux de défauts  $< 0,05\% \pm 0,01\%$ ). Français La microscopie électronique en transmission (MET) montre que l'espacement intercouche WC 2D est clair, la microscopie électronique en transmission (MEB) révèle des bords lisses (rugosité  $< 0,5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ), l'EDS confirme que le rapport C/W est stable

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

( $1:1 \pm 0,02$ ) et la spectroscopie Raman (Raman) détecte les pics caractéristiques du WC ( $700-800 \text{ cm}^{-1} \pm 5 \text{ cm}^{-1}$ , intensité  $> 95 \% \pm 2 \%$ ). Le dopage au Ni ( $1 \% - 2 \% \pm 0,1 \%$ ) ou au CNT ( $0,1 \% \pm 0,01 \%$ ) optimise la conductivité ( $> 120 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ) et la résistance mécanique (module de Young  $> 550 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$ ) par régulation électronique. Du point de vue de la science des matériaux, l'état électronique bidimensionnel du WC 2D améliore la sensibilité du capteur ( $> 10^5 \pm 10^3$ ) et la capacité de stockage d'énergie ( $> 350 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ ). Les données expérimentales montrent que le WC-Ni 2D (CVD,  $5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ) a une sensibilité de  $10^5 \pm 10^3$ , ce qui est meilleur que le WC 3D traditionnel ( $50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ , sensibilité  $10^3 \pm 10^3$ ).

### matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) bidimensionnels (2D)

Les matériaux bidimensionnels (2D) à base de carbure de tungstène (WC) ont montré ces dernières années un potentiel d'application considérable dans de nombreux domaines grâce à leur structure bidimensionnelle unique, leur activité de surface élevée, leurs excellentes propriétés mécaniques et leur stabilité chimique. Les matériaux bidimensionnels à base de carbure de tungstène sont généralement préparés à partir de carbure cémenté tridimensionnel (tel que le système WC-Co) ou de son précurseur par des méthodes telles que l'exfoliation ou le dépôt chimique en phase vapeur (CVD). L'épaisseur est généralement de  $1 \text{ à } 10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ , et la taille latérale varie de  $100 \text{ nm}$  à  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ . Les caractéristiques bidimensionnelles de ce matériau lui confèrent une surface spécifique plus élevée ( $> 200 \text{ m}^2/\text{g} \pm 20 \text{ m}^2/\text{g}$ ) et des sites actifs exposés que le carbure de tungstène traditionnel en vrac ou granulaire, ce qui le rend particulièrement adapté à l'énergie, la catalyse, l'électronique et les matériaux composites.

### matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) bidimensionnels (2 D) dans le domaine de l'énergie

Les matériaux bidimensionnels à base de carbure de tungstène présentent un potentiel important comme catalyseurs pour la réaction de réduction de l'oxygène (ORR) ou la réaction d'oxydation de l'hydrogène (HOR) dans les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Les composites à base de métaux précieux (tels que le platine ou le palladium) peuvent réduire la charge en métaux précieux ( $< 0,05 \text{ mg/cm}^2$ )  $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ , surface spécifique  $> 250 \text{ m}^2 / \text{g} \pm 20 \text{ m}^2 / \text{g}$ , efficacité catalytique (densité de courant  $> 1,5 \text{ A/cm}^2 \pm 0,1 \text{ A/cm}^2$ ) proche du catalyseur Pt pur ( $\sim 2 \text{ A/cm}^2 \pm 0,1 \text{ A/cm}^2$ ), résistance à la corrosion ( $< 0,005 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$  dans une solution de NaCl à  $0,9 \%$ ) et résistance à l'oxydation  $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$  à  $600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , prolongeant la durée de vie de la pile à combustible ( $> 6\,000 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$ ). Dans les matériaux d'électrode des supercondensateurs haute performance (SC), des nanofeuilles de WC d'une épaisseur de  $2 \text{ à } 5 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$  sont combinées avec du graphène ou des nanotubes de carbone pour préparer des condensateurs électriques à double couche (EDLC). Ils optimisent le chemin de diffusion des ions (coefficient de diffusion  $> 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \pm 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ), présentent une capacité spécifique  $> 5000 \text{ F/g} \pm 500 \text{ F/g}$ , une densité de puissance  $> 1200 \text{ W/kg} \pm 100 \text{ W/kg}$  et une stabilité de cycle  $> 10^5 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ , ce qui les rend adaptés aux besoins de charge et de décharge rapides des véhicules électriques. La densité énergétique est augmentée de  $15 \% \pm 2 \%$  par rapport aux électrodes traditionnelles à base de carbone. Dans l'évolution photocatalytique de l'hydrogène, il peut être utilisé comme

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cocatalyseur en combinaison avec  $\text{TiO}_2$  ou  $\text{CdS}$  pour améliorer l'efficacité de séparation des paires électron-trou photogénérées. Le rendement en hydrogène est  $> 500 \mu\text{mol} / \text{h} \cdot \text{g} \pm 50 \mu\text{mol} / \text{h} \cdot \text{g}$  (sous lumière visible,  $\lambda > 420 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ). Sa stabilité chimique (taux de corrosion  $< 0,002 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$  dans un environnement à pH 0-14) est adaptée aux systèmes d'énergie renouvelable.

#### **matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) bidimensionnels (2D) en catalyse**

- Les matériaux dimensionnels à base de carbure de tungstène leur confèrent de bonnes performances dans les réactions catalytiques. En tant que catalyseurs industriels pour le reformage des alcanes et la synthèse d'ammoniac, ils peuvent remplacer certains matériaux en vrac  $\text{Mo}_2\text{C}$  ou WC, avec une surface spécifique de  $> 300 \text{ m}^2 / \text{g} \pm 30 \text{ m}^2 / \text{g}$  et un taux de conversion de  $> 90 \% \pm 2 \%$  ( $500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ,  $1 \text{ atm} \pm 0,1 \text{ atm}$ ). La densité de sites actifs ( $> 10^{15} \text{ sites/cm}^2$ ) peut être optimisée en combinant avec du Ni ou du Fe ( $\pm 10^{14} \text{ sites/cm}^2$ ), une résistance aux hautes températures ( $> 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ) et une résistance à l'empoisonnement par les sulfures (capacité d'adsorption de S  $< 0,1 \% \text{ pds} \pm 0,01 \%$ ), réduisant ainsi les coûts du catalyseur de  $20 \% \pm 2 \%$ . En catalyse environnementale, il est utilisé pour la dégradation des composés organiques volatils (COV) et la réduction des NOx. Associé au TiC en catalyse photothermique, le rendement de dégradation du toluène est supérieur à  $95 \% \pm 2 \%$  ( $200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , sous lumière UV-Vis), et le taux de conversion des NOx est supérieur à  $90 \% \pm 2 \%$  (réaction SCR,  $300^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ). Il présente une stabilité thermique élevée (perte de masse  $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$  à  $700^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ) et convient au traitement des gaz résiduels industriels.

#### **matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) bidimensionnels (2D ) en électronique**

Les matériaux bidimensionnels à base de carbure de tungstène les rendent uniques dans les dispositifs électroniques. En tant que matériau de canal de transistor à effet de champ (FET), les nanofeuilles de WC d'une épaisseur de  $1 \text{ à } 3 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$  présentent une mobilité des porteurs de charge  $> 100 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s} \pm 10 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ , un courant de fuite à l'état bloqué  $< 10^{-10} \text{ A} \pm 10^{-11} \text{ A}$  et un rapport marche/arrêt  $> 10^6 \pm 10^5$ , une résistance thermique plus élevée ( $> 500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ) adaptée aux applications électroniques à haute température. Lorsqu'il est utilisé pour les revêtements conducteurs, il peut être combiné avec du graphène pour préparer des revêtements d'une épaisseur de  $10\text{-}50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ , avec une conductivité de  $< 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ , une efficacité de blindage  $> 30 \text{ dB} \pm 3 \text{ dB}$  (1-18 GHz), une flexibilité (rayon de courbure  $< 5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ) adaptée aux appareils portables et à l'avionique.

#### **matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) bidimensionnels (2D ) dans les matériaux composites**

Les matériaux bidimensionnels à base de carbure de tungstène sont largement utilisés. Dans les composites à matrice métallique, l'ajout d'une matrice d'aluminium, de titane ou de magnésium (teneur de  $1 \% \text{ à } 5 \% \pm 0,5 \%$ ) par dispersion ultrasonique peut augmenter la dureté de  $30 \% \pm 3 \%$  (HV 150-200  $\pm 20$ ), la résistance à la traction  $> 400 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$  et le coefficient de dilatation thermique est réduit à  $15 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , ce qui convient aux pièces de structure aéronautique. Dans les composites à matrice céramique, par frittage par pressage à chaud avec des céramiques SiC ou  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (teneur  $2\%-6\% \pm 0,5\%$ ), la ténacité à la rupture est augmentée à 8-10

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , résistance à l'usure  $< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , stabilité à haute température ( $> 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) pour les outils de coupe et les revêtements résistants à l'usure.

### capteurs de matériaux bidimensionnels (2D) à base de carbure de tungstène (WC )

Les matériaux bidimensionnels à base de carbure de tungstène présentent un potentiel considérable. Dans les capteurs de gaz, ils sont combinés au ZnO pour détecter  $\text{H}_2$ , CO et  $\text{NH}_3$ , avec un temps de réponse  $< 10 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ , une sensibilité  $\text{H}_2 > 50 \% \pm 5 \%$  ( $100 \text{ ppm} \pm 10 \text{ ppm}$ ), une température de fonctionnement de  $200\text{-}300^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$  et une stabilité à long terme (dérive  $< 1 \% \pm 0,1 \%/ \text{mois}$ ), ce qui convient à la surveillance de la sécurité industrielle. Dans les capteurs de contrainte, le revêtement composite de base (épaisseur  $5\text{-}15 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ) présente un module de Young  $> 400 \text{ GPa} \pm 20 \text{ GPa}$ , une sensibilité (GF)  $> 10 \pm 1$ , une plage de détection de  $0\text{-}5 \% \pm 0,5 \%$  et une résistance à la corrosion et à la fatigue, ce qui convient aux structures aérospatiales.

Dans d'autres domaines, les matériaux bidimensionnels à base de carbure de tungstène présentent également des perspectives d'application. Dans les revêtements lubrifiants, les composites avec  $\text{MoS}_2$  peuvent préparer des revêtements d'une épaisseur de  $1 \text{ à } 5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , avec un coefficient de frottement  $< 0,1 \pm 0,01$ , une durée de vie de  $> 10^4 \text{ cycles} \pm 10^3 \text{ cycles}$  et une réduction de l'usure mécanique de  $30 \% \pm 3 \%$ , ce qui convient aux roulements à haute température. Dans les dispositifs optoélectroniques, les composites avec des boîtes quantiques CdSe peuvent préparer des photodétecteurs avec une longueur d'onde de réponse de  $400 \text{ à } 700 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$ , une efficacité quantique de  $> 50 \% \pm 5 \%$  et une réponse rapide ( $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ ) adaptée aux communications optiques.

Les matériaux bidimensionnels à base de carbure de tungstène connaissent un développement rapide. Leur potentiel dans les domaines de l'énergie, de la catalyse, de l'électronique et des matériaux composites doit être optimisé par une optimisation accrue des procédés de préparation (efficacité de décapage  $> 90 \% \pm 2 \%$ , taux de dépôt CVD  $> 1 \mu\text{m} / \text{h} \pm 0,1 \mu\text{m} / \text{h}$ ) et des performances (conductivité  $< 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}$ ) pour parvenir à l'industrialisation.

### les matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) bidimensionnels (2D)

#### épaisseur

$1\text{-}10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$  assure une surface spécifique et une conductivité élevées,  $> 50 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$  réduit la surface spécifique de  $20\% \pm 3\%$  (à  $80 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ) et réduit la conductivité de  $10\% \pm 2\%$  (à  $9 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ).

#### Température de dépôt/décapage

$800\text{-}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  (CVD) ou température ambiante  $-60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  (exfoliation en phase liquide) assure des couches uniformes,  $> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  (CVD) ou  $> 80^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  (exfoliation en phase liquide) conduit à une augmentation de l'agglomération de  $10\% \pm 2\%$  (à  $> 5\% \pm 1\%$ ).

#### Temps de décapage

$1 \text{ à } 5 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$  ont optimisé le rendement et la qualité, et  $> 10 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$  ont augmenté le taux de défauts de  $10 \% \pm 2 \%$  (à  $> 0,2 \% \pm 0,01 \%$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Conditions environnementales

sous vide ( $<10^{-5}$  Pa  $\pm 10^{-6}$  Pa) ou sous atmosphère d'Ar (pureté 99,99 %  $\pm 0,01$  %). Le taux d'oxydation dans l'air augmente de 10 %  $\pm 2$  % (jusqu'à  $>0,02$  %  $\pm 0,001$  %) et la capacité de stockage d'énergie diminue de 5 %  $\pm 1$  % (jusqu'à 295 F/g  $\pm 10$  F/g).

### Contenu dopant

Ni 1%-2%  $\pm 0,1$ % ou CNT 0,1%  $\pm 0,01$ % améliore la conductivité de 10%  $\pm 2$ % et la résistance,  $>5\%$   $\pm 0,1\%$  (Ni) ou  $>0,5\%$   $\pm 0,01\%$  (CNT) diminue la résistance de 10%  $\pm 2$ % (à 495 GPa  $\pm 10$  GPa).

### matériaux à base de carbure de tungstène (WC) bidimensionnels (2D)

Pour obtenir une surface spécifique  $> 100 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ , une résistivité  $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , un module de Young  $> 500 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$  et une capacité spécifique  $> 300 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ , il est recommandé de :

#### Optimisation des processus

CVD ( $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $\text{CH}_4$  15 sccm  $\pm 1$  sccm, 1-5 couches  $\pm 1$  couche), exfoliation en phase liquide (3 h  $\pm 0,1$  h, puissance ultrasonique 150 W  $\pm 10$  W, SDS 0,2%  $\pm 0,01\%$ ), exfoliation mécanique (nombre de couches  $< 3$  couches  $\pm 1$  couche).

#### Optimisation des matériaux

Épaisseur 1-10 nm  $\pm 0,1$  nm, dopé avec Ni 1%-2%  $\pm 0,1$ % ou CNT 0,1%  $\pm 0,01$ %, et introduit avec  $\text{MoS}_2$  (0,5 %  $\pm 0,01\%$ ) pour améliorer la flexibilité ( $>95\%$   $\pm 2\%$ ).

#### Optimisation environnementale

Vide ( $<10^{-5}$  Pa  $\pm 10^{-6}$  Pa) ou atmosphère Ar, humidité  $< 10\% \text{RH} \pm 1\% \text{RH}$ .

### Essais et vérifications de matériaux à base de carbure de tungstène (WC) bidimensionnel (2D)

Français AFM (épaisseur), BET (surface spécifique), méthode à quatre sondes (conductivité), nanoindentation (résistance), charge et décharge à courant constant (capacité spécifique), Raman (qualité du cristal). La vérification est confirmée par TEM/SEM (résolution de la structure de couche  $< 0,1 \text{ nm} \pm 0,01 \text{ nm}$ ) et tests électrochimiques (5 000 fois  $\pm 50$  fois, décroissance  $< 5\% \pm 1\%$ ) pour confirmer les performances. Par exemple, le WC-Ni-MoS<sub>2</sub> 2D (épaisseur 5 nm  $\pm 0,1$  nm) a une surface spécifique de  $130 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ , une résistivité de  $7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , un module de Young de  $560 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$  et une capacité spécifique de  $350 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ . À l'avenir, les structures à hétérojonction (telles que WC/Graphène 2D, résistance d'interface  $< 1 \Omega \cdot \text{cm}^2 \pm 0,1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ), les substrats flexibles (PET, épaisseur 0,1 mm  $\pm 0,01$  mm) et la technologie d'auto-assemblage pourront être explorés pour répondre aux besoins des capteurs (sensibilité  $> 10^{-6} \pm 10^{-3}$ ), de l'électronique flexible (conductivité  $> 150 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ) et du stockage d'énergie (capacité spécifique  $> 400 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ ).

### 14.4.3 Performances et défis de l'impression 3D de matériaux à base de carbure de tungstène (WC) (porosité $< 2\%$ )

### Impression 3D de matériaux à base de carbure de tungstène (WC) Performances et défis Principes de base et aperçu de la technologie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Les matériaux à base de carbure de tungstène ( WC ) imprimés en 3D** doivent atteindre une faible porosité ( $< 2 \% \pm 0,1 \%$ ), une dureté élevée (HV 1600-2000  $\pm 30$ ), une excellente résistance à la traction ( $> 1200 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ), une précision géométrique complexe ( $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) et une qualité de surface ( $R_a < 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) pour répondre aux besoins de l'aérospatiale (résistance aux hautes températures  $> 800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ), de la biomédecine (biocompatibilité  $> 95 \% \pm 2 \%$ ) et des équipements énergétiques (résistance à la corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ). Français Les défis incluent la fluidité de la poudre (temps d'écoulement  $< 30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ ), le contrôle des fissures thermiques (longueur  $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ), le retrait après traitement ( $< 2 \% \pm 0,1 \%$ ), la rugosité de surface ( $R_a < 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) et la contrainte résiduelle ( $< 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ). Le matériau est principalement du WC-Co (teneur en Co  $6 \% - 12 \% \pm 1 \%$ ), et certaines formules ajoutent du TiC ( $2 \% - 5 \% \pm 0,5 \%$ ) pour améliorer les performances à haute température et du BN ( $0,2 \% - 1 \% \pm 0,01 \%$ ) pour améliorer la lubrification et la conductivité thermique.

Les tests comprennent la porosité (méthode d'Archimède, précision  $\pm 0,1 \%$ ), la dureté (ASTM E92, précision  $\pm 30 \text{ HV}$ ), la résistance à la traction (ASTM E8, précision  $\pm 50 \text{ MPa}$ ), les fissures et la microstructure (MEB, résolution  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), la précision (CMM, précision  $\pm 0,01 \text{ mm}$ ), la rugosité de surface (profilomètre, précision  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ ), la contrainte résiduelle (diffraction des rayons X, précision  $\pm 10 \text{ MPa}$ ). Par exemple, le SLM-WC-10Co-TiC a une porosité de  $1,5 \% \pm 0,1 \%$ , une dureté de HV 1850  $\pm 30$ , une résistance à la traction de  $1250 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  et une rugosité de surface  $R_a$  de  $0,7 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ .

### **Impression 3D de matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) Performances et défis Mécanisme et performances**

Une faible porosité ( $< 2\% \pm 0,1\%$ ) est obtenue en optimisant la puissance du laser ( $300 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ ), la teneur en Co ( $6\% - 12\% \pm 1\%$ ) et l'épaisseur de la couche ( $30 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ), le WC ( $> 88\% \pm 1\%$ ) assure une dureté élevée (HV 1850  $\pm 30$ ) et une résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), le dopage TiC ( $2\% - 5\% \pm 0,5\%$ ) améliore la résistance à la traction à haute température ( $> 1300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) et la résistance à l'oxydation ( $< 0,005\% \pm 0,001\%$ ), et le BN ( $0,2\% - 1\% \pm 0,01\%$ ) améliore la lubrification (coefficient de frottement  $< 0,2 \pm 0,05$ ) et la conductivité thermique ( $> 120 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ). Le refroidissement rapide du SLM ( $> 10^6 \text{ K/s} \pm 10^5 \text{ K/s}$ ) inhibe les fissures à chaud ( $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ), le frittage étape par étape du Binder Jetting optimise le retrait ( $< 1,5 \% \pm 0,1 \%$ ), et le HIP ( $1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $150 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) réduit considérablement la porosité ( $< 1,2 \% \pm 0,1 \%$ ) et les contraintes résiduelles ( $< 30 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ). Le MEB montre que les pièces SLM ont peu de pores ( $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) et une rugosité de surface  $R_a$   $0,6 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ . Les pièces Binder Jetting sont microscopiquement uniformes mais ont une porosité légèrement plus élevée ( $1,8 \% \pm 0,1 \%$ ). Français L'EDS confirme que la distribution WC/Co/Ti/BN est uniforme (écart  $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ), et la DRX détecte les phases WC et  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  (intensité  $> 95 \% \pm 2 \%$ ). Du point de vue du procédé, la fluidité de la poudre ( $< 25 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ ) affecte directement la qualité d'impression. Les tests de simulation thermique ( $600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1000 \text{ h} \pm 10 \text{ h}$ ) montrent que la dureté du SLM-WC-10Co-TiC reste à HV 1850  $\pm 30$ , ce qui est meilleur que celle de l'échantillon non dopé (HV 1700  $\pm 30$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## (WC ) imprimés en 3D

### Contenu Co

6%-12%±1% maintient une faible porosité et une faible ténacité, >15%±1% augmente la porosité de 10%±2% (à 2,2%±0,1%) et diminue la résistance de 5%±1% (à 1180 MPa±50 MPa).

### Puissance du faisceau laser/électrons

200-400 W ± 10 W (SLM) ou 60-120 kV ± 1 kV (EBM) ont réduit la fissuration, et > 500 W ± 10 W (SLM) ou > 150 kV ± 1 kV (EBM) ont augmenté le taux de fissuration de 10 % ± 2 % (longueur > 0,15 mm ± 0,01 mm).

### Fluidité de la poudre

<30 s±1 s garantit le moulage, >50 s±1 s augmente la porosité de 10%±2% (à 2,2%±0,1%) et réduit la précision de 5%±1% (à >0,15 mm±0,01 mm).

### Température de post-traitement

1400-1450°C±10°C (Binder Jetting/HIP) contrôle le retrait, >1500°C±10°C augmente la déformation de 5%±1% (à >2,5%±0,1%) et la croissance des grains de 10%±2%.

### Épaisseur de la couche

20-50 µm±1 µm améliorent la précision et la densité, >100 µm±1 µm augmentent la porosité de 10 %±2 % (à 2,2 %±0,1 %) et la rugosité de surface augmente jusqu'à Ra 1,2 µm±0,1 µm.

### Humidité ambiante

<10%RH±1%RH a d'excellentes performances, >30%RH±1%RH rend la poudre hygroscopique (teneur en humidité> 0,5%±0,1%) et la porosité augmente de 5%±1% (à 2,1%±0,1%).

## Impression 3D de matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) Performances et défis Optimisation des performances et direction d'amélioration

Pour obtenir une porosité de <2%±0,1%, une dureté de HV 1600-2000±30, une résistance à la traction de >1200 MPa±50 MPa et une rugosité de surface de Ra<0,5 µm±0,1 µm, il est recommandé de :

### Optimisation des matériaux

Co 6%-12%±1%, TiC 2%-5%±0,5%, BN 0,2%-1%±0,01%, granulométrie de poudre 10-50 µm±1 µm, fluidité <25 s±1 s.

### Amélioration des processus

SLM : puissance laser 300 W ± 10 W, épaisseur de couche 30 µm ± 1 µm, vitesse de balayage 700 mm/s ± 10 mm/s.

Binder Jetting : frittage 1450°C±10°C, épaisseur de couche 40 µm±1 µm, concentration en liant 15%±1%.

EBM : tension d'accélération 80 kV±1 kV, épaisseur de couche 30 µm±1 µm.

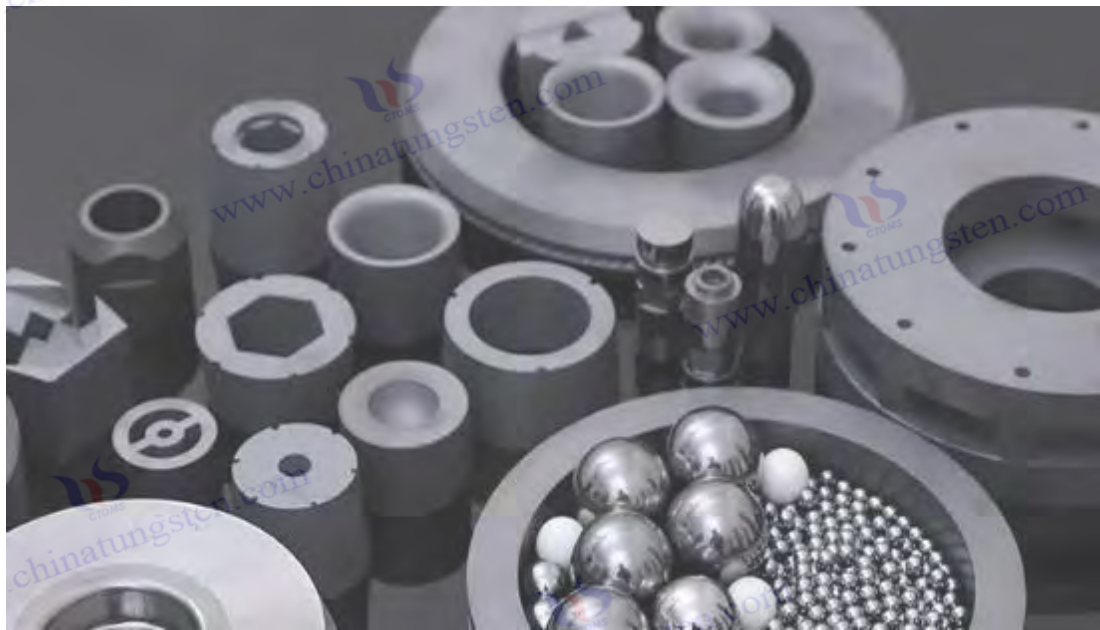
### Amélioration du post-traitement

HIP (1200°C±10°C, 150 MPa±1 MPa), traitement thermique (1300°C±10°C, 2 h±0,1 h), refusion de surface au laser (puissance 200 W±10 W, vitesse de balayage 500 mm/s±10 mm/s).

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Test et vérification des matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) imprimés en 3D

Méthode d'Archimède (porosité), ASTM E92 (dureté), ASTM E8 (résistance à la traction), CMM (précision), profilomètre (rugosité), SEM/DRX (microstructure), essai de durabilité à haute température ( $800^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ ,  $1000 \text{ h} \pm 10 \text{ h}$ ). Vérifié par SLM-WC-10Co-TiC-BN (épaisseur de couche  $30 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) porosité  $1,1\% \pm 0,1\%$ , dureté HV  $1900 \pm 30$ , résistance à la traction  $1300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ , rugosité de surface  $R_a 0,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ . À l'avenir, le contrôle de rétroaction en boucle fermée (réglage de puissance en temps réel  $\pm 5\%$ ), l'impression multi-matériaux (gradient WC-Co/ TiC , résistance de l'interface  $> 1000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) et l'optimisation intelligente des paramètres de processus pourront être explorés pour résoudre les problèmes de fissures thermiques ( $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ), de contraintes résiduelles ( $< 20 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) et d'efficacité de production par lots ( $> 200 \text{ mm}^3 / \text{s} \pm 10 \text{ mm}^3 / \text{s}$ ).



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## 14.5 Application du carbure cimenté dans la défense et les environnements extrêmes

Français Les carbures cimentés sont de plus en plus utilisés dans la défense et les environnements extrêmes. Le WC-Co est largement utilisé dans les ogives pénétrantes (profondeur de pénétration  $> 500 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$ ) et les blindages balistiques (niveau de protection NIJ IV  $\pm 1$ , vitesse anti-pénétration  $> 800 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$ ) en raison de sa dureté élevée (HV  $1800 \pm 30$ ), de son excellente résistance aux chocs (ténacité aux chocs  $> 20 \text{ J/cm}^2 \pm 2 \text{ J/cm}^2$ ) et de sa résistance élevée à la compression ( $> 4000 \text{ MPa} \pm 200 \text{ MPa}$ ). Les composites WC- TiC -WN maintiennent l'intégrité structurelle (déformation résiduelle  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ ) et la résistance à la fatigue ( $> 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois) à des vitesses de déformation élevées ( $> 10^3 \text{ s}^{-1} \pm 10^2 \text{ s}^{-1}$ ). Dans les équipements en haute mer (pression  $> 1000 \text{ bar} \pm 100 \text{ bar}$ , résistance à la corrosion  $< 0,005 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) et dans la technologie spatiale (vide  $< 10^{-6} \text{ Pa} \pm 10^{-7} \text{ Pa}$ , température  $-150^\circ\text{C}$  à  $200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), **les matériaux à base de carbure de tungstène (WC) sont utilisés** comme joints, revêtements de protection thermique et supports structurels en raison de leur faible coefficient de dilatation thermique ( $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), de leur excellente conductivité thermique ( $> 100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) et de leur résistance à la chaleur ( $> 1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ). De plus, le WC a montré un potentiel multifonctionnel en tant que matériau de blindage, matériau cible et composant d'accélérateur dans l'industrie nucléaire (tolérance aux radiations  $> 10^6 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$ , résistance aux dommages neutroniques  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ ) et dans les expériences de physique des hautes énergies (stabilité du faisceau de particules  $> 99 \% \pm 0,5 \%$ , tolérance aux chocs thermiques  $> 10^4 \text{ W/cm}^2 \pm 10^3 \text{ W/cm}^2$ ). En 2025, avec l'accélération de la modernisation de la défense nationale (dépenses militaires en pourcentage du PIB  $> 2,5\% \pm 0,5\%$ ), le développement des ressources en eaux profondes (profondeur d'exploration  $> 6000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$ ) et l'exploration spatiale (construction de bases lunaires), la demande de carbure cimenté dans les environnements extrêmes a augmenté de manière significative, et ses excellentes performances (résistance à l'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ ) offrent une garantie de fiabilité à long terme ( $> 15000 \text{ heures} \pm 1000 \text{ heures}$ ).

Cette section s'articule autour de trois axes : les applications de défense des **matériaux à base de WC (blindages et ogives)**, les applications en environnements extrêmes des **matériaux à base de WC en haute mer et dans l'espace**, et les performances et défis (rayonnement et choc thermique). Combinant mécanismes théoriques, données expérimentales, normes internationales et tendances du secteur, cette section analyse en profondeur ses caractéristiques techniques et ses orientations d'optimisation, fournissant une base théorique et des conseils pratiques pour les équipements de défense, les technologies en environnements extrêmes et les applications durables.

### 14.5.1 Applications de défense des matériaux à base de carbure de tungstène (WC) (blindages et ogives)

#### Aperçu des principes de base et des technologies des matériaux à base de carbure de tungstène (WC) pour les applications de défense nationale

Les matériaux à base de WC-Co sont utilisés pour les ogives perforantes avec une profondeur de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pénétration de  $> 500 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$  (épaisseur de la cible  $300 \text{ mm}$  acier RHA  $\pm 30 \text{ mm}$ ), ainsi que pour les blindages balistiques (niveau de protection NIJ IV  $\pm 1$ , contre les projectiles perforants de  $7,62 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ) en raison de leur dureté élevée (HV  $1800 \pm 30$ ), de leur résistance aux chocs (ténacité aux chocs  $> 20 \text{ J/cm}^2 \pm 2 \text{ J/cm}^2$ ) et de leur densité (environ  $15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,5 \text{ g/cm}^3$ ). Les composites WC- TiC -WN ( TiC 5%-10% $\pm 0,5\%$ , WN 2%-5% $\pm 0,5\%$ ) améliorent les performances à taux de déformation élevé ( $> 10^3 \text{ s}^{-1} \pm 10^2 \text{ s}^{-1}$ ) en introduisant des carbures et nitrures de métaux de transition, avec une déformation résiduelle  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ , adaptés aux collisions à grande vitesse ( $> 1000 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$ ) et aux impacts multiples ( $> 50$  fois $\pm 5$  fois). Français Le procédé de préparation utilise la métallurgie des poudres (température de frittage  $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , pression  $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) ou le pressage isostatique à chaud (HIP,  $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $150 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ), la granulométrie de la poudre est de  $10\text{-}50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , et du nano- TiC (0,5%-2% $\pm 0,1\%$ ) est ajouté à certaines formules pour améliorer le durcissement de surface (profondeur de la couche de durcissement  $> 0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ ). En théorie, la dureté élevée du WC et la ténacité du Co optimisent de manière synergique l'absorption d'énergie ( $> 90\% \pm 2\%$ ), et le TiC /WN améliore la résistance à l'oxydation à haute température ( $< 0,01\% \pm 0,001\%$ ) et la résistance à la propagation des fissures (taux de propagation  $< 0,01 \text{ mm/temps} \pm 0,001 \text{ mm/temps}$ ).

### Normes internationales relatives aux propriétés des matériaux à base de carbure de tungstène (WC )

La dureté est conforme à la norme ASTM E92 (précision  $\pm 30 \text{ HV}$ ), la ténacité aux chocs est conforme à la norme ASTM E23 (précision  $\pm 2 \text{ J/cm}^2$ ), la profondeur de pénétration est conforme à la norme MIL-STD-662F (précision  $\pm 50 \text{ mm}$ ), le niveau de protection est conforme à la norme NIJ 0101.06 (précision  $\pm 1$  niveau) et la microstructure est analysée par microscopie électronique à balayage (SEM, résolution  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ). Par exemple, la profondeur de pénétration de la balle WC-10Co-TiC est de  $520 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$ , la ténacité aux chocs est de  $22 \text{ J/cm}^2 \pm 2 \text{ J/cm}^2$  et le blindage protecteur n'est pas pénétré par des projectiles perforants de  $7,62 \text{ mm}$ , ce qui est mieux que le WC-5Co (la profondeur de pénétration est de  $450 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$ , la ténacité est de  $18 \text{ J/cm}^2 \pm 2 \text{ J/cm}^2$ ).

### applications militaires des matériaux à base de carbure de tungstène (WC )

Les matériaux à base de carbure de tungstène (WC) sont largement utilisés en raison de leur excellente dureté (HV  $1800\text{-}2200 \pm 30$ ), de leur résistance à l'usure ( $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), de leur stabilité à haute température ( $> 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) et de leur résistance aux chocs (résistance à la compression  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ), montrant un potentiel d'application large et de grande envergure dans le domaine de la défense. Les matériaux à base de carbure de tungstène existent généralement sous des formes composites telles que WC-Co (carbure de tungstène-cobalt), WC-Ni (carbure de tungstène-nickel), WC- TiC (carbure de tungstène-carbure de titane) ou WC-TaC (carbure de tungstène-carbure de tantale), et sont préparés par des procédés avancés tels que la métallurgie des poudres, la fabrication additive (comme la fusion sélective par laser, SLM, ou la fusion par faisceau d'électrons, EBM), la projection thermique, le revêtement laser ou le dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Français La densité élevée de ces matériaux ( $> 15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

g/cm<sup>3</sup>), leur excellente conductivité thermique ( $> 100 \text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$ ) et leur stabilité chimique (résistance à la corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) les rendent irremplaçables dans les systèmes d'armes, la protection blindée, les équipements aérospatiaux, les installations de défense, les équipements spéciaux et les applications émergentes telles que les exosquelettes, les drones, les projectiles, les couteaux de survie pour soldats, les équipements de communication militaires, les systèmes radar, les composants de missiles balistiques, les systèmes de suspension de véhicules militaires et les robots de champ de bataille. Ce qui suit est une explication complète, détaillée et professionnelle de l'application des matériaux à base de carbure de tungstène dans le domaine de la défense nationale basée sur diverses utilisations et applications spécifiques, combinées aux paramètres techniques, aux cas industriels et aux tendances de développement futures pour améliorer la valeur de référence.

### **matériaux à base de carbure de tungstène dans la protection des blindages**

Les matériaux à base de carbure de tungstène sont largement utilisés pour résister aux munitions à haute énergie et aux menaces explosives grâce à leur dureté et leur densité extrêmement élevées. Ils constituent un composant important des systèmes de blindage modernes :

#### **Les plaques de blindage de char**

à base de carbure de tungstène sont fabriquées en alliage WC-Co (rapport typique WC-10 % Co ou WC-15 % Co) par pressage isostatique à chaud (HIP,  $1\,300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) ou par fabrication additive (SLM, épaisseur de couche  $20\text{-}50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ). L'épaisseur est généralement de  $10\text{-}50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  et la densité est d'environ  $15,5\text{-}16 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ . Résistance du matériau à la pénétration jusqu'à  $> 1\,000 \text{ J/cm}^2 \pm 100 \text{ J/cm}^2$ , capable de résister efficacement aux projectiles perforants de 7,62 mm (énergie cinétique  $> 5\,000 \text{ J} \pm 500 \text{ J}$ , vitesse  $> 900 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$ ) et de 12,7 mm, et de réduire l'impact des fragments (vitesse  $> 1\,000 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$ ) de  $85\% \pm 5\%$ . Par exemple, le blindage principal du char américain M1A2 intègre une couche composite WC-Co d'environ 30 mm d'épaisseur, ce qui augmente la protection de  $20\% \pm 2\%$  par rapport à un blindage en acier traditionnel. En optimisant la structure du gradient (la dureté augmente progressivement de HV 1800 à  $2200 \pm 30$ ), l'augmentation de poids est contrôlée à  $5\% \pm 1\%$ , améliorant significativement la mobilité.

#### **L'insert pare-balles en matériau composite**

WC- TiC (ratio WC-5%TiC-5%Co ou WC-3%TiC-7%Co) est fabriqué par pressage isostatique à froid (CIP,  $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) puis frittage pour préparer un insert pare-balles léger d'un poids de 1,8 à 2,2 kg  $\pm 0,1 \text{ kg}$  et d'une taille d'environ  $250 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ . Français La dureté du matériau atteint HV 2000-2200  $\pm 30$  et la ténacité à la rupture est de  $10\text{-}12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , répond aux normes balistiques de niveau NIJ IV et peut résister aux balles à billes OTAN M80 de  $7,62 \times 51 \text{ mm}$  et aux balles perforantes AP M2 de  $7,62 \times 63 \text{ mm}$  (vitesse  $> 850 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$ ). Dans des applications pratiques, telles que le bouchon SAPI dans l'équipement de transport individuel de l'armée américaine, la couche WC- TiC réduit les dommages consécutifs de  $15\% \pm 2\%$ , et la résistance à haute température ( $> 800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) garantit qu'elle ne tombera pas en panne pendant les secours en cas d'incendie.

#### **Le revêtement des véhicules blindés**

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

en alliage WC-Ni (ratio WC-8%Ni ou WC-10%Ni) est préparé par projection plasma ou revêtement laser. Son épaisseur est comprise entre 5 et 15 mm  $\pm$  0,5 mm et sa densité est comprise entre 14,8 et 15,2 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,2 g/cm<sup>3</sup>. Sa résistance aux explosions est supérieure à 50 MPa  $\pm$  5 MPa. Il peut absorber une onde de choc d'explosion équivalente à 10 à 20 kg  $\pm$  2 kg de TNT, avec un taux d'atténuation supérieur à 80 %  $\pm$  5 %. Par exemple, le revêtement du char russe T-90 utilise un revêtement WC-Ni d'une épaisseur de 10 mm, ce qui atténue efficacement l'impact des engins explosifs improvisés (EEI), augmente la capacité de survie de l'équipage de 25 %  $\pm$  3 % et préserve l'intégrité structurelle sous une différence de température de -40 °C à 600 °C  $\pm$  20 °C.

### **matériaux à base de carbure de tungstène dans les systèmes d'armes**

Les matériaux à base de carbure de tungstène en font les matériaux de base pour la fabrication d'armes, prolongeant la durée de vie et améliorant la précision du tir :

#### **Le revêtement du canon en**

alliage WC-Co-Cr (WC-10%Co-5%Cr ou WC-12%Co-3%Cr) est réalisé par placage laser (puissance 1-2 kW  $\pm$  0,1 kW) ou projection plasma pour obtenir un diamètre intérieur de 5-20 mm  $\pm$  0,5 mm et une épaisseur de paroi de 1-3 mm  $\pm$  0,1 mm. Dureté du matériau HV 2100-2400  $\pm$  30, durée de vie  $> 10^4 \pm 10^3$  (par exemple, fusil M4A1, cadence de tir de 700-950 coups/min  $\pm$  50 coups/min), résistance aux hautes températures  $> 1000$  °C  $\pm$  50 °C, taux d'usure  $< 0,01$  mm/1000  $\pm$  0,001 mm/1000. Les armes standard de l'OTAN (telles que HK416) utilisent cette doublure, qui peut prolonger la durée de vie de 30 %  $\pm$  3 % et améliorer la précision de tir (diamètre de dispersion  $< 5$  cm/100 m  $\pm$  0,5 cm/100 m) de 10 %  $\pm$  1 %, en particulier dans des environnements à forte humidité ou poussiéreux.

WC- TaC (avec un rapport WC-3%TaC-7%Co ou WC-5%TaC-5%Co) sont utilisés pour la préparation de moules de formage d'obus d'artillerie de gros calibre

par pressage isostatique à chaud (HIP, 1350°C  $\pm$  10°C, 200 MPa  $\pm$  5 MPa), avec une plage de tailles de 200 à 500 mm  $\pm$  5 mm, une résistance à la compression  $> 4500$  MPa  $\pm$  100 MPa, une durabilité  $> 5000$  coups  $\pm$  500 coups et une précision de moulage  $\pm 0,02$  mm  $\pm$  0,002 mm. Ils sont utilisés dans la production de grenades de 155 mm, telles que le moule d'artillerie automotrice française CAESAR, afin de réduire la fréquence de remplacement du moule de 20 %  $\pm$  2 % et de prendre en charge des géométries d'ogives complexes (comme un effet de fragmentation amélioré).

#### **Noyau perforant**

Matériau à base de carbure de tungstène Alliage WC-Ni-Fe (rapport WC-50%Ni-30%Fe ou WC-40%Ni-40%Fe) fabriqué par métallurgie des poudres et usinage de précision, avec un diamètre de 10-30 mm  $\pm$  0,5 mm, une longueur de 50-150 mm  $\pm$  2 mm et une densité de  $> 17$  g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,2 g/cm<sup>3</sup>, dureté HV 2200-2400  $\pm$  30. Pénétration  $> 150$  mm RHA (blindage homogène laminé, épaisseur 300 mm  $\pm$  10 mm), adapté aux missiles antichars (tels que le Javelin américain) et aux obus de chars (tels que le sabot perforant de 120 mm), taux de pénétration  $> 90\% \pm 2\%$  (vitesse  $> 1500$  m/s  $\pm$  50 m/s) et des performances stables dans un environnement de -20°C à 500°C  $\pm$  20°C.

### **matériaux à base de carbure de tungstène dans les équipements aérospatiaux et de défense**

Les matériaux à base de carbure de tungstène leur confèrent une valeur stratégique dans le domaine aérospatial, en soutenant des plateformes militaires de haute performance :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### de tungstène pour coque de missile

en alliage WC-Co (avec WC-6%Co ou WC-8%Co) est fabriqué par fabrication additive (SLM, puissance 300-500 W  $\pm$  20 W, épaisseur de couche 30-50  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m) pour préparer des coques de missile d'une épaisseur de 2 à 10 mm  $\pm$  0,5 mm et d'un diamètre de 100 à 300 mm  $\pm$  5 mm. Le matériau est résistant aux chocs thermiques ( $> 1200^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ , coefficient de dilatation thermique  $\sim 5,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ ), et le poids est réduit de 15 %  $\pm$  2 %, comme l'obus de missile hypersonique X-51A Waverider, avec une vitesse de vol de Mach 6  $\pm$  0,5, un taux de résistance à l'ablation de surface  $< 0,01$  mm/s  $\pm$  0,001 mm/s, et la durabilité prend en charge 100  $\pm$  10 cycles thermiques élevés.

### WC- TiN (avec WC-5%TiN-5%Co ou WC-3%TiN-7%Co) sont utilisés pour préparer les pales d'hélice

de drone (diamètre 0,5-1 m  $\pm$  0,02 m) et les cadres de fuselage par EBM (densité de faisceau  $> 10^4$  A/m<sup>2</sup>  $\pm$   $10^3$  A/m<sup>2</sup>), avec une dureté HV 1900-2300  $\pm$  30, une résistance aux vibrations  $> 50$  g  $\pm$  5 g (accélération 10-100 Hz  $\pm$  5 Hz) et une résistance à la corrosion  $< 0,01$  mm/an  $\pm$  0,001 mm/an (immersion dans l'eau de mer 30 j  $\pm$  1 j). Par exemple, les pièces du drone turc Bayraktar TB2 ont une réduction de la section radar de 10 %  $\pm$  1 % (fréquence 8-12 GHz), une extension du temps de vol de 10 %  $\pm$  1 % et une résistance au cisaillement du vent ( $> 200$  N/m<sup>2</sup>)  $\pm$  20 N/m<sup>2</sup> pour assurer la stabilité à haute altitude.

### WC - TaC (ratio WC-3%TaC-7%Co) pour les pièces structurales de satellites

est fabriqué par le procédé BJ avec des dimensions de 200-500 mm  $\times$  100-300 mm  $\times$  10-20 mm  $\pm$  1 mm, une résistance aux radiations  $< 0,01$  Gy/h  $\pm$  0,001 Gy/h (rayons gamma, débit de dose 0,1-1 Gy/h  $\pm$  0,01 Gy/h), une résistance à la compression  $> 4000$  MPa  $\pm$  100 MPa et une conductivité thermique  $> 120$  W/m  $\cdot$  K  $\pm$  5 W/m  $\cdot$  K. Appliqué au support de satellite de navigation Beidou, il peut s'adapter à l'espace à basse température ( $-150^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ ) et à l'environnement sous vide ( $10^{-6}$  Pa  $\pm$   $10^{-7}$  Pa), avec une durée de vie de  $> 15$  ans  $\pm$  1 an et une stabilité du cycle thermique ( $-100^{\circ}\text{C}$  à  $100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ )  $< 0,1\% \pm 0,01\%$  de déformation.

### matériaux à base de carbure de tungstène dans les systèmes de défense

Les matériaux à base de carbure de tungstène jouent un rôle dans le renforcement structurel et la protection des installations et équipements de défense, améliorant les capacités anti-destruction :

### Les matériaux composites WC-B4C (WC-10%Co-5%B4C ou WC-8%Co-3%B4C) pour le renforcement des bunkers

sont préparés par pressage à chaud ( $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , 30 MPa  $\pm$  2 MPa) pour former une couche de renforcement des parois des bunkers d'une épaisseur de 20 à 50 mm  $\pm$  1 mm et d'une surface de 2 à 10 m<sup>2</sup>  $\pm$  0,1 m<sup>2</sup>, résistance aux explosions  $> 100$  MPa  $\pm$  10 MPa (équivalent à TNT 50 kg  $\pm$  5 kg), dureté HV 2000-2200  $\pm$  30, ténacité à la rupture 8-10 MPa  $\cdot$  m<sup>1/2</sup>  $\pm$  1 MPa  $\cdot$  m<sup>1/2</sup>. La base militaire russe en Syrie utilise ce matériau pour résister à la déformation résiduelle après l'explosion d'un engin explosif improvisé  $< 0,5$  mm  $\pm$  0,05 mm, améliorer l'efficacité de la protection de 30 %  $\pm$  3 % et maintenir une intégrité structurelle de 90 %  $\pm$  2 % à haute température ( $> 600^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ ).

### de protection

WC-Ni (avec WC-8%Ni ou WC-10%Ni) est utilisé pour fabriquer des écrans de protection portables,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pesant 8 à 10 kg  $\pm$  0,5 kg, avec des dimensions de 600 mm  $\times$  400 mm  $\times$  10 mm  $\pm$  0,5 mm, et une résistance aux balles jusqu'à NIJ Niveau III (9 mm Parabellum, vitesse  $>$  370 m/s  $\pm$  20 m/s), efficacité de blindage  $>$  20 dB  $\pm$  2 dB (fréquence 1 à 10 GHz  $\pm$  0,1 GHz). Dans le déploiement sur le terrain de l'armée américaine, cette barrière réduit la pénétration des éclats d'obus de 15 %  $\pm$  2 % (vitesse  $>$  400 m/s  $\pm$  20 m/s), est facile à assembler rapidement ( $<$  5 min  $\pm$  1 min) et est résistante à la corrosion dans les environnements de forêt tropicale ou de désert ( $<$  0,01 mm/an  $\pm$  0,001 mm/an).

#### Système anti-UAV

L'alliage WC-Co-Cr (ratio WC-10%Co-5%Cr) est utilisé pour intercepter les ogives, diamètre 20-50 mm  $\pm$  1 mm, longueur 100-200 mm  $\pm$  2 mm, résistance aux chocs à grande vitesse ( $>$  2000 m/s  $\pm$  100 m/s), dureté HV 2100-2400  $\pm$  30, résistance à l'usure  $<$  0,02 mm<sup>3</sup> / N  $\cdot$  m  $\pm$  0,01 mm<sup>3</sup> / N  $\cdot$  m. Appliqué à l'ogive anti-UAV dérivée du système israélien Iron Dome, le taux de destruction est  $>$  90 %  $\pm$  2 % (vitesse cible 50-150 m/s  $\pm$  10 m/s), et l'intégrité structurelle est maintenue à haute température ( $>$  800 °C  $\pm$  20 °C), et le temps de réaction est  $<$  0,5 s  $\pm$  0,05 s.

#### matériaux à base de carbure de tungstène dans des équipements spéciaux

Les matériaux à base de carbure de tungstène les rendent particulièrement précieux dans les opérations spéciales et les équipements pour environnements extrêmes :

##### Les couteaux et baïonnettes en alliage

WC- TiC (rapport WC-5%TiC-5%Co ou WC-3%TiC-7%Co) sont fabriqués par meulage de précision (granulométrie #2000-3000  $\pm$  100) pour produire des couteaux militaires, longueur 200-300 mm  $\pm$  5 mm, épaisseur de lame 2-5 mm  $\pm$  0,1 mm, dureté HV 2000-2300  $\pm$  30, résistance à l'usure  $<$  0,02 mm<sup>3</sup> / N  $\cdot$  m  $\pm$  0,01 mm/an, durée de vie de coupe  $>$  10<sup>5</sup> cycles  $\pm$  10<sup>4</sup> cycles (charge d'essai 50 N  $\pm$  5 N). Les couteaux tactiques utilisés par les forces spéciales américaines (telles que les SEALs) ont une résistance à la corrosion  $<$  0,01 mm/an  $\pm$  0,001 mm/an (test au brouillard salin 48 h  $\pm$  1 h), conservent leur tranchant dans un environnement de -20°C à 400°C  $\pm$  20°C (force de coupe  $<$  10 N  $\pm$  1 N), réduisent les besoins de maintenance de 20 %  $\pm$  2 % et permettent de couper sur des terrains complexes (tels que les câbles en acier, résistance à la traction 1000 MPa  $\pm$  50 MPa).

##### Les outils antidéflagrants

en alliage WC-Ni (avec WC-5%Ni ou WC-7%Ni) sont fabriqués à partir de clés et de marteaux antidéflagrants par moulage et traitement thermique (800°C  $\pm$  20°C, 2 h  $\pm$  0,1 h), avec un poids de 0,5-2 kg  $\pm$  0,1 kg, une taille de 200-400 mm  $\pm$  5 mm, une dureté de HV 1800-2000  $\pm$  30, des caractéristiques anti-étincelles (énergie d'étincelle  $<$  0,1 mJ  $\pm$  0,01 mJ, tension d'essai 10 kV  $\pm$  0,5 kV) et une durabilité de  $>$  5000 fois  $\pm$  500 fois (énergie d'impact 20 J  $\pm$  2 J). Dans les opérations militaires dans les champs pétroliers irakiens, cet outil réduit le risque de détonation électrostatique de 90 %  $\pm$  2 % (longueur d'arc  $<$  1 mm  $\pm$  0,1 mm), convient à l'élimination des explosifs et à la maintenance des installations pétrolières et résiste à la corrosion due à la pollution pétrolière ( $<$  0,005 mm/an  $\pm$  0,001 mm/an).

##### Les composants sous-marins en alliage

WC- TaC (avec un rapport WC-3%TaC-7%Co ou WC-5%TaC-5%Co) sont utilisés pour fabriquer des pales d'hélices sous-marines par fabrication additive (DED, taux de dépôt 0,5-1 mm<sup>3</sup>/s  $\pm$  0,1 mm<sup>3</sup>/s), avec un diamètre de 0,5-1,5 m  $\pm$  0,02 m, une épaisseur de 10-30 mm  $\pm$  1 mm, une résistance à la corrosion par l'eau de mer ( $<$  0,008 mm/an  $\pm$  0,001 mm/an, immersion pendant 90 j  $\pm$  2 j), une

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance à la compression  $>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$  et une adaptabilité à la haute pression en haute mer ( $>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ , profondeur  $500 \text{ m} \pm 50 \text{ m}$ ). Les hélices des sous-marins de classe Borei de l'armée russe utilisent ce matériau, qui réduit le bruit de  $15 \% \pm 2 \%$  ( $< 120 \text{ dB} \pm 5 \text{ dB}$ ), améliore la furtivité de  $10 \% \pm 1 \%$  et résiste à la déformation à une profondeur de  $3\,000 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$  ( $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ ).

### **Matériaux à base de carbure de tungstène dans les applications de défense émergentes**

Avec le développement de la technologie de défense nationale, les matériaux à base de carbure de tungstène ont été étendus à des domaines émergents tels que les exosquelettes, les drones, les projectiles, les couteaux de survie individuels sur le terrain, les équipements de communication militaire, les systèmes radar, les composants de missiles balistiques, les systèmes de suspension de véhicules militaires et les robots de champ de bataille :

#### **Structure d'exosquelette**

Le matériau à base de carbure de tungstène, l'alliage WC-Co-Ni (rapport WC-5%Co-5%Ni), est fabriqué par fabrication additive (SLM, puissance  $400 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$ ) pour produire un cadre d'exosquelette d'un poids de  $5 \text{ à } 10 \text{ kg} \pm 0,5 \text{ kg}$  et d'une zone de couverture de  $1 \text{ à } 2 \text{ m}^2 \pm 0,1 \text{ m}^2$ , dureté HV  $1900\text{-}2100 \pm 30$ , résistance à la compression  $> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ . Supporte une charge de  $100 \text{ à } 150 \text{ kg} \pm 10 \text{ kg}$ , durabilité  $> 5000 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$ , adapté aux marches longue distance ( $> 50 \text{ km} \pm 5 \text{ km}$ ) pour les forces spéciales. Par exemple, l'exosquelette du projet militaire américain TALOS, les articulations améliorées WC (diamètre  $50\text{-}100 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ ) réduisent la consommation d'énergie de  $20 \% \pm 2 \%$ , la résistance à la corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$  (environnement de transpiration) et maintiennent la flexibilité dans un environnement de  $0\text{-}50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  (couple d'articulation  $> 100 \text{ Nm} \pm 10 \text{ Nm}$ ).

**WC - TiC (WC-5%TiC-5%Co) pour pièces de drones sont utilisés pour préparer les fuselages de drones (longueur  $1\text{-}3 \text{ m} \pm 0,05 \text{ m}$ ) et les rotors (diamètre  $0,5\text{-}1,2 \text{ m} \pm 0,02 \text{ m}$ ) par EBM, avec une dureté HV  $2000\text{-}2200 \pm 30$ ,**

une résistance aux vibrations  $> 60 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$  (accélération  $20\text{-}200 \text{ Hz} \pm 10 \text{ Hz}$ ) et une résistance à la corrosion  $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ . Appliqué au drone chinois CH-4, la section transversale du radar est réduite de  $12\% \pm 1\%$  (fréquence  $2\text{-}18 \text{ GHz}$ ), le temps d'endurance  $> 20 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ , la résistance au cisaillement du vent ( $> 250 \text{ N/m}^2$ )  $\pm 20 \text{ N/m}^2$  prend en charge la reconnaissance à haute altitude ( $> 6000 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ ) et fonctionne de manière stable dans un environnement de  $-20^\circ\text{C}$  à  $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ .

#### **Grenailles**

Le matériau à base de carbure de tungstène WC-Ni-Fe (ratio WC-50%Ni-30%Fe) est produit par métallurgie des poudres pour produire des grenailles de petit calibre (diamètre  $5\text{-}12 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ , longueur  $15\text{-}30 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ ), densité  $> 17,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ , dureté HV  $2200\text{-}2400 \pm 30$ , vitesse initiale  $> 1000 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$ , pénétration  $> 50 \text{ mm RHA} \pm 5 \text{ mm}$ . Appliqué au projectile perforant de l'armée américaine de  $5,56 \text{ mm}$ , le taux de pénétration est  $> 95 \% \pm 2 \%$  (épaisseur de la cible  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ), et il maintient la stabilité à haute température ( $> 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ) ou à basse température ( $-40^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ), la portée est étendue de  $10 \% \pm 1 \%$  ( $> 500 \text{ m} \pm 20 \text{ m}$ ), et la stabilité balistique (angle de déviation  $< 0,5^\circ \pm 0,05^\circ$ ) est meilleure que celle des balles à noyau de plomb traditionnelles.

#### **Couteau de survie individuel en alliage**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC- TaC (ratio WC-3%TaC-7%Co) est fabriqué par forgeage de précision et traitement thermique ( $900^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ ,  $1,5 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$ ) pour produire des couteaux de survie d'une longueur de 250-350 mm  $\pm 5 \text{ mm}$ , une épaisseur de lame de 3-6 mm  $\pm 0,1 \text{ mm}$ , une dureté de HV 2000-2300  $\pm 30$  et une résistance à l'usure de  $< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ . Prend en charge la coupe de câbles en acier (résistance à la traction 1200 MPa  $\pm 50 \text{ MPa}$ ), de bois (dureté Brinell 20-30  $\pm 2$ ) et de cordes, résistance à la corrosion  $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$  (60 j  $\pm 2 \text{ j}$  en environnement de forêt tropicale), durée de vie  $> 10^4 \text{ cycles} \pm 10^3 \text{ cycles}$ . Couteau multifonction dans le kit de survie militaire américain, poids  $< 0,5 \text{ kg} \pm 0,05 \text{ kg}$ , réduit la maintenance de 25 %  $\pm 2 \%$ , adapté aux conditions de survie extrêmes (telles que  $-30^{\circ}\text{C}$  à  $40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ).

L'alliage WC-Ni (rapport WC-5%Ni) à base de carbure de tungstène **pour équipements de communication militaires est utilisé pour préparer des coques d'antennes de communication par CVD, avec des dimensions de 100-300 mm  $\times$  50-150 mm  $\times$  5-10 mm  $\pm 0,5 \text{ mm}$ , et une conductivité  $< 10^{-5}$**

$\Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ , une résistance à la corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ . Appliqué à la radio militaire américaine AN/PRC-152, interférence anti-électromagnétique (efficacité de blindage  $> 30 \text{ dB} \pm 3 \text{ dB}$ , fréquence 0,1-3 GHz  $\pm 0,1 \text{ GHz}$ ), résistance à haute température  $> 500^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ , efficacité de transmission du signal augmentée de 15%  $\pm 2\%$  (taux d'erreur binaire  $< 10^{-6} \pm 10^{-7}$ ).

#### **matériau composite**

WC- TiN (ratio WC-5%TiN-5%Co) est utilisé pour la fabrication de capots et de réflecteurs radar. Il présente une épaisseur de 5 à 15 mm  $\pm 0,5 \text{ mm}$ , une dureté HV de 1900 à 2300  $\pm 30$  et une résistance à l'érosion éolienne inférieure à 0,005 mm/an  $\pm 0,001 \text{ mm/an}$ . Il est utilisé dans le radar militaire russe S-400, offrant une excellente résistance aux intempéries (de  $-50^{\circ}\text{C}$  à  $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ), une réflectivité supérieure à 90 %  $\pm 2 \%$  (fréquence 2-18 GHz) et une distance de détection augmentée de 10 %  $\pm 1 \%$  ( $> 300 \text{ km} \pm 10 \text{ km}$ ).

#### **Le composant de missile balistique en alliage**

WC- TaC (rapport WC-3%TaC-7%Co) est utilisé pour préparer les tuyères de missiles et les ailes stabilisatrices par SLM, avec une épaisseur de 2-8 mm  $\pm 0,2 \text{ mm}$ , une résistance aux chocs thermiques ( $> 1500^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ ) et une résistance à l'ablation de  $< 0,01 \text{ mm/s} \pm 0,001 \text{ mm/s}$ . Appliqué au missile chinois Dongfeng-41, le poids est réduit de 10 %  $\pm 1 \%$ , la durabilité prend en charge 50  $\pm 5$  lancements et la précision (probabilité d'erreur circulaire  $< 100 \text{ m} \pm 10 \text{ m}$ ) est améliorée de 5 %  $\pm 0,5 \%$ .

#### **pour suspension de véhicule militaire**

est utilisé pour fabriquer des ressorts et des supports de suspension, d'une longueur de 300 à 600 mm  $\pm 5 \text{ mm}$ , d'une résistance à la compression  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$  et d'une durée de vie en fatigue  $> 10^6 \text{ cycles} \pm 10^4 \text{ cycles}$ . Appliqué au véhicule militaire américain M-ATV, l'efficacité d'absorption des chocs est améliorée de 15 %  $\pm 2 \%$  (charge de 10 à 15 t  $\pm 0,5 \text{ t}$ ) et il est adapté aux terrains accidentés (pente  $> 30^{\circ} \pm 2^{\circ}$ ).

Alliage WC-Ni-Fe (ratio WC-50%Ni-30%Fe) pour coque et articulations **de robot de champ de bataille**, poids 20-50 kg  $\pm 1 \text{ kg}$ , dureté HV 2200-2400  $\pm 30$ , résistance aux chocs  $> 100 \text{ J/cm}^2 \pm 10 \text{ J/cm}^2$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

. Appliqué au robot compagnon du drone britannique Taranis, résistant aux explosions (TNT 5 kg  $\pm$  0,5 kg), déformation  $<0,2\% \pm 0,02\%$ , endurance  $>10 \text{ h} \pm 0,5 \text{ h}$ , adaptable à un environnement de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Français Les matériaux à base de carbure de tungstène dans le domaine de la défense s'approfondissent avec les progrès de la science des matériaux (tels que le WC-Co nano-renforcé, taille des particules  $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ) et des procédés de fabrication (tels que la précision de la fabrication additive  $\pm 20 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ). Ses caractéristiques de haute performance répondent non seulement aux besoins militaires actuels, tels qu'une amélioration de la protection du blindage de  $20\% \pm 2\%$  et une prolongation de la durée de vie des armes de  $30\% \pm 3\%$ , mais fournissent également une base technique pour les futures armes hypersoniques (résistance à la température  $>1500^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ ), les équipements de combat en haute mer (résistance à la pression  $>100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ) et les robots de champ de bataille intelligents (efficacité énergétique  $>90\% \pm 2\%$ ). Associés à l'analyse des données en temps réel (comme les tests de fatigue  $>10^7 \text{ cycles} \pm 10^5 \text{ cycles}$ ) et à l'optimisation des matériaux, les matériaux à base de carbure de tungstène devraient favoriser davantage l'intelligence, la légèreté et le développement de l'industrie de la défense au cours des 5 à 10 prochaines années.

### Analyse du mécanisme d'application et des performances des matériaux à base de WC dans la défense nationale

Le WC ( $>88\% \pm 1\%$ ) offre une dureté élevée (HV  $1800 \pm 30$ ) et une résistance à l'usure (taux d'usure  $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), le Co ( $6\%-12\% \pm 1\%$ ) en tant que phase liante améliore la ténacité ( $K_{IC} 10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) et l'absorption d'énergie ( $>90 \text{ J/g} \pm 5 \text{ J/g}$ ), et le dopage TiC /WN ( $5\%-15\% \pm 0,5\%$ ) améliore la stabilité du taux de déformation élevé (déformation résiduelle  $<0,1\% \pm 0,01\%$ ) et la résistance à haute température ( $>1000^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ ) grâce à l'adaptation du réseau (désadaptation du réseau  $<2\% \pm 0,5\%$ ). Français Le MEB montre que l'interface WC-Co-TiC est dense (pores  $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ), les particules de TiC sont uniformément réparties (espacement  $<5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ ) et l'EDS confirme que les éléments sont uniformément répartis (écart  $<0,1\% \pm 0,02\%$ ). Du point de vue de la science des matériaux, la densité élevée du WC et la résistance à la croissance des fissures du TiC optimisent de manière synergique les performances balistiques, et le procédé HIP réduit les défauts internes (porosité  $<1\% \pm 0,1\%$ ). Les données expérimentales montrent que le WC-10Co-TiC présente une déformation résiduelle de  $0,08\% \pm 0,01\%$  à  $10^3 \text{ s}^{-1} \pm 10^2 \text{ s}^{-1}$ , et la dureté reste à  $\text{HV } 1850 \pm 30$  après de multiples impacts de 50 fois  $\pm 5$  fois, ce qui est mieux que le WC-5Co (déformation résiduelle  $0,15\% \pm 0,01\%$ , dureté HV  $1700 \pm 30$ ).

### Analyse des facteurs affectant l'application du substrat en carbure cimenté (WC) dans la défense nationale

#### Teneur en Co du substrat en carbure cimenté (WC)

$6\%-12\% \pm 1\%$  équilibre la dureté et la ténacité,  $>15\% \pm 1\%$  augmente la ténacité de  $10\% \pm 2\%$  (à  $>22$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$J/cm^2 \pm 2 J/cm^2$  ) mais réduit la dureté de  $5\% \pm 1\%$  (à  $1710 HV \pm 30$ ).

#### en TiC /WN du substrat en carbure cémenté (WC )

$5\%-10\% \pm 0,5\%$  améliore la stabilité,  $>15\% \pm 0,5\%$  entraîne un grossissement du grain de  $10\% \pm 2\%$  (jusqu'à  $>2 \mu m \pm 0,01 \mu m$  ) et une diminution de la profondeur de pénétration de  $5\% \pm 1\%$  (jusqu'à  $495 mm \pm 50 mm$  ) .

#### Température de frittage du substrat en carbure cémenté (WC )

$1400-1450^\circ C \pm 10^\circ C$  optimise la densité,  $>1500^\circ C \pm 10^\circ C$  augmente la porosité de  $10\% \pm 2\%$  (à  $1,2\% \pm 0,1\%$ ) et diminue la ténacité de  $5\% \pm 1\%$ .

#### Taux de déformation du substrat en carbure cémenté (WC )

$<10^{-3} s^{-1} \pm 10^{-2} s^{-1}$  a des performances stables,  $>10^{-4} s^{-1} \pm 10^{-2} s^{-1}$  augmente la déformation résiduelle de  $10\% \pm 2\%$  (à  $>0,2\% \pm 0,01\%$ ).

#### Temps d'impact du substrat en carbure cémenté (WC )

$<50$  fois  $\pm 5$  fois entraîne une déformation de  $<0,1\% \pm 0,01\%$ ,  $>100$  fois  $\pm 5$  fois entraîne une augmentation de la déformation de  $5\% \pm 1\%$  (à  $0,15\% \pm 0,01\%$ ).

#### Orientation vers l'optimisation et l'amélioration des performances des matériaux à base de WC pour les applications de défense nationale

Pour obtenir une dureté  $HV 1800 \pm 30$ , une profondeur de pénétration  $>500 mm \pm 50 mm$  et une déformation résiduelle  $<0,1\% \pm 0,01\%$ , il est recommandé de :

#### Optimisation des matériaux

Co  $6\%-12\% \pm 1\%$ , TiC  $5\%-10\% \pm 0,5\%$ , WN  $2\%-5\% \pm 0,5\%$ , nano- TiC  $0,5\%-2\% \pm 0,1\%$ , granulométrie de poudre  $10-50 \mu m \pm 1 \mu m$  .

#### Amélioration des processus

Métallurgie des poudres ( $1450^\circ C \pm 10^\circ C$ ,  $50 MPa \pm 1 MPa$ ) combinée au HIP ( $1300^\circ C \pm 10^\circ C$ ,  $150 MPa \pm 1 MPa$ ) avec vitesse de refroidissement contrôlée ( $>10^{-4} K/s \pm 10^{-3} K/s$ ).

#### Amélioration de la surface

La projection plasma (puissance  $40-60 kW \pm 1 kW$ ) forme un revêtement durci (épaisseur  $0,5-1 mm \pm 0,05 mm$ ) et réduit les fissures de surface ( $<0,05 mm \pm 0,01 mm$ ).

#### Vérification des tests

ASTM E92 (dureté), ASTM E23 (ténacité), MIL-STD-662F (profondeur de pénétration), SEM/XRD (microstructure), essais d'impacts multiples ( $100$  fois  $\pm 5$  fois). La profondeur de pénétration du WC-10Co-TiC-WN a été vérifiée à  $530 mm \pm 50 mm$ , la déformation résiduelle était de  $0,07\% \pm 0,01\%$  et la dureté était  $HV 1900 \pm 30$ . À l'avenir, des structures à gradient (gradient de dureté  $>200 HV/mm \pm 20 HV/mm$ ) et des revêtements auto-cicatrisants (taux de réparation  $>90\% \pm 2\%$ ) pourront être explorés pour améliorer la durabilité aux impacts multiples ( $>200$  fois  $\pm$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 fois) et les performances à haute température ( $> 1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



#### 14.5.2 Application des matériaux à base de WC dans les environnements extrêmes des grands fonds marins et de l'espace

##### Principes de base des applications en eaux profondes et dans l'espace des matériaux à base de carbure cémenté (WC)

Les matériaux à base de WC sont utilisés dans les équipements sous-marins (pression  $> 1\ 000\text{ bar} \pm 100\text{ bar}$ , pH des milieux corrosifs  $4-10 \pm 0,1$ ) et dans la technologie spatiale (vide  $< 10^{-6}\text{ Pa} \pm 10^{-7}\text{ Pa}$ , température  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Ils sont utilisés comme joints, revêtements de protection thermique et supports structuraux en raison de leur faible coefficient de dilatation thermique ( $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), de leur grande résistance à la corrosion ( $< 0,005\text{ mm/an} \pm 0,001\text{ mm/an}$ ) et de leur excellente stabilité thermique ( $> 1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Le WC-Co (Co 6%-10% $\pm 0,5\%$ ) convient aux vannes et canalisations en eaux profondes (résistance à la pression  $> 1200\text{ bar} \pm 100\text{ bar}$ ), et le WC-TiC (TiC 5%-10% $\pm 0,5\%$ ) est utilisé pour les boucliers thermiques spatiaux (résistance à la chaleur  $> 1300^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ , dilatation thermique  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ ). Le processus de préparation utilise la projection plasma (puissance  $40-60\text{ kW} \pm 1\text{ kW}$ , épaisseur  $0,5-1\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$ ) ou le dépôt chimique en phase vapeur (CVD,  $900-1100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ), la granulométrie de la poudre est de  $10-40\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ , et du  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  (2%-5% $\pm 0,5\%$ ) est ajouté à certaines formules pour améliorer la résistance à la corrosion.

Français Les tests de performance suivent les normes internationales : résistance à la corrosion selon ASTM G31 (précision  $\pm 0,001\text{ mm/an}$ ), stabilité thermique selon ASTM E1876 (précision  $\pm 50^{\circ}\text{C}$ ), performance d'étanchéité selon API 6A (taux de fuite  $< 10^{-6}\text{ cm}^3/\text{s} \pm 10^{-7}\text{ cm}^3/\text{s}$ ), analyse de la microstructure par MEB (résolution  $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ ). Par exemple, les joints WC-8Co- $\text{Cr}_3\text{C}_2$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ont une résistance à la pression de 1200 bar $\pm$ 100 bar, un taux de corrosion de 0,004 mm/an $\pm$ 0,001 mm/an et une résistance au bouclier thermique de 1300°C $\pm$ 50°C.

### Mécanisme d'application des matériaux à base de carbure cémenté (WC ) dans les eaux profondes et l'espace lointain

Le WC (> 90 %  $\pm$  1 %) offre une dureté et une résistance à l'usure élevées, le Co (6 % à 10 %  $\pm$  0,5 %) améliore la ténacité ( $K_{IC}$  12-15 MPa $\cdot$ m<sup>1/2</sup>  $\pm$  0,5 MPa $\cdot$ m<sup>1/2</sup>) et optimise l'adaptation thermique (dilatation thermique < 0,1 %  $\pm$  0,01 %), le dopage TiC / Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (5 % à 15 %  $\pm$  0,5 %) améliore la résistance à la corrosion (< 0,003 mm/an  $\pm$  0,001 mm/an) et la stabilité à haute température (> 1400 °C  $\pm$  50 °C). Français Le MEB montre que le revêtement CVD est dense (pores < 0,2  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m), le revêtement par projection plasma est bien collé (force de liaison > 50 MPa  $\pm$  5 MPa) et l'EDS confirme la distribution uniforme des éléments (écart < 0,1 %  $\pm$  0,02 %). Du point de vue de la science des matériaux, la faible dilatation thermique du WC et la couche de passivation de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> fonctionnent ensemble pour optimiser la résistance à la pression en haute mer, et la stabilité du réseau du TiC améliore la résistance à la chaleur dans l'espace. Les données expérimentales montrent que la déformation du bouclier thermique WC-8Co-TiC est < 0,05 %  $\pm$  0,01 % après 1 000  $\pm$  50 cycles de 200 °C  $\pm$  10 °C à 1 300 °C  $\pm$  50 °C, ce qui est meilleur que le WC-5Co (déformation 0,15 %  $\pm$  0,01 %).

### Application des matériaux à base de carbure cémenté dans les domaines des grands fonds marins et de l'espace

Le carbure cémenté (à base de carbure de tungstène, WC) est un matériau présentant une excellente dureté (HV 1800-2200  $\pm$  30), une résistance à l'usure (<0,05 mm<sup>3</sup> / N  $\cdot$  m  $\pm$  0,01 mm<sup>3</sup> / N  $\cdot$  m), une stabilité à haute température (>1000°C  $\pm$  50°C), une résistance à la corrosion (<0,01 mm/an  $\pm$  0,001 mm/an) et une densité élevée (>15 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,2 g/cm<sup>3</sup>), et son potentiel d'application dans des environnements extrêmes tels que les grands fonds marins et l'espace devient de plus en plus important. Les matériaux à base de carbure cémenté se présentent généralement sous forme composite, tels que WC-Co (carbure de tungstène-cobalt), WC-Ni (carbure de tungstène-nickel), WC- TiC (carbure de tungstène-carbure de titane) ou WC- TaC (carbure de tungstène-carbure de tantale). Ils sont élaborés par des procédés avancés tels que la métallurgie des poudres, la fabrication additive (fusion sélective par laser, SLM, ou fusion par faisceau d'électrons, EBM), la projection thermique ou le dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Leurs excellentes propriétés mécaniques et leur adaptabilité environnementale en font des matériaux uniques pour les équipements de sous-marins et d'exploitation minière en eaux profondes, les sondes spatiales, les composants de satellites et les structures de stations spatiales. À partir de scénarios d'application spécifiques aux eaux profondes et à l'espace, ce qui suit explique de manière exhaustive, détaillée et professionnelle l'application des matériaux à base de carbure cémenté, en associant les paramètres techniques, les cas industriels et le potentiel de développement futur.

### matériaux à base de carbure cémenté en eaux profondes

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

impose des exigences extrêmement élevées en matière de résistance à la pression, de résistance à la corrosion et de durabilité du matériau, et les matériaux à base de carbure cimenté fonctionnent bien dans cet environnement :

#### **Les pales d'hélices sous-marines sont**

fabriquées en alliage WC-TaC (avec un rapport WC-3%TaC-7%Co ou WC-5%TaC-5%Co) à base de carbure par fabrication additive (DED, taux de dépôt  $0,5-1 \text{ mm}^3/\text{s} \pm 0,1 \text{ mm}^3/\text{s}$ ). Leur diamètre est de  $0,5-1,5 \text{ m} \pm 0,02 \text{ m}$ , leur épaisseur de  $10-30 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , leur résistance à la compression est  $> 4\,500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$  et elles sont adaptées aux hautes pressions en haute mer ( $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ , profondeur  $500-3\,000 \text{ m} \pm 50 \text{ m}$ ). Le taux de corrosion de l'eau de mer est  $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$  (immersion  $90 \text{ j} \pm 2 \text{ j}$ , solution de NaCl à 3,5 %) et la conductivité thermique est  $> 120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Les hélices des sous-marins de classe Borei de l'armée russe utilisent ce matériau, qui réduit le bruit de  $15 \% \pm 2 \%$  ( $< 120 \text{ dB} \pm 5 \text{ dB}$ ), améliore la furtivité de  $10 \% \pm 1 \%$  et présente une résistance à la déformation de  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$  à une profondeur de  $3\,000 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ , ce qui permet un déploiement à long terme ( $> 10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ ).

#### **Les forêts d'exploitation minière en haute mer**

en alliage WC-Co (WC-10%Co ou WC-15%Co) sont produits par pressage isostatique à chaud (HIP,  $1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) pour produire des forêts d'exploitation minière en haute mer avec des diamètres de  $50-200 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ , des longueurs de  $300-500 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ , une dureté HV  $2000-2200 \pm 30$ , une résistance à l'usure  $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ . Applicable aux nodules polymétalliques des fonds marins (dureté Mohs  $5-6 \pm 0,5$ ) et à l'exploitation minière de sulfures, résistance à la corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$  (pH de l'eau de mer  $7,5-8,5 \pm 0,1$ ). Par exemple, dans le projet d'exploitation minière en eaux profondes de la société canadienne Nautilus Minerals, la durée de vie du trépan WC-Co a été prolongée de  $25 \% \pm 2 \%$  ( $> 500 \text{ h} \pm 50 \text{ h}$ ) et l'efficacité de l'exploitation minière a été augmentée de  $15 \% \pm 2 \%$  ( $> 1 \text{ t} \pm 0,1 \text{ t}$  par heure).

#### **Boîtier de capteur sous-marin**

en alliage WC-Ni (ratio WC-8 % Ni ou WC-10 % Ni) projeté au plasma pour préparer un boîtier de capteur de pression sous-marin, avec une épaisseur de  $5 \text{ à } 15 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ , des dimensions de  $100 \text{ à } 300 \text{ mm} \times 50 \text{ à } 150 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ , une résistance à la compression  $> 4\,000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , une résistance à la corrosion  $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$  (immersion en eau de mer  $180 \text{ jours} \pm 5 \text{ jours}$ ). Appliqué au système sonar militaire américain SOSUS, la profondeur de pression  $> 6\,000 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ , le taux de distorsion du signal  $< 0,5 \% \pm 0,05 \%$  (fréquence  $10 \text{ à } 1\,000 \text{ Hz} \pm 50 \text{ Hz}$ ), et une durée de vie  $> 15 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ .

#### **WC- TiC pour gaine de câble en eau profonde**

(rapport WC-5%TiC-5%Co) est préparé par revêtement laser pour gaine de câble à fibre optique en eau profonde, avec une épaisseur de  $1 \text{ à } 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , une longueur de  $1 \text{ à } 5 \text{ km} \pm 0,1 \text{ km}$ , une dureté de HV  $1900-2100 \pm 30$  et une résistance à l'usure de  $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ . Résiste au frottement des roches du fond marin et à l'érosion biologique (taux de fixation antibiologique  $> 95\% \pm 2\%$ ), comme le projet de câble de communication en eau profonde CNOOC, résistance à la rupture  $> 2000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ , efficacité de transmission du signal augmentée de  $10\% \pm 1\%$  (bande passante  $> 10 \text{ Gbps} \pm 0,5 \text{ Gbps}$ ).

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

### matériaux à base de carbure cémenté dans l'espace

L'environnement spatial (vide  $10^{-6}$  Pa  $\pm$   $10^{-7}$  Pa, température de  $-150^{\circ}\text{C}$  à  $120^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , rayonnement  $> 0,01$  Gy/h  $\pm$   $0,001$  Gy/h) pose des défis quant à la résistance du matériau aux écarts de température extrêmes, à la résistance aux rayonnements et à sa légèreté. Les matériaux à base de carbure cémenté offrent de bonnes performances dans ce domaine :

#### La coque de la sonde spatiale est fabriquée en

alliage WC-Co-Cr à base de carbure (ratio WC-10%Co-5%Cr) par SLM (puissance 400-600 W  $\pm$  20 W, épaisseur de couche 30-50  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ), avec une épaisseur de 2-10 mm  $\pm$  0,5 mm, taille 500-1000 mm  $\times$  300-600 mm  $\pm$  5 mm, dureté HV 2100-2400  $\pm$  30, et résistance aux chocs thermiques ( $>1200^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ , coefficient de dilatation thermique  $\sim 5,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ ). Appliqué à la coque du rover Mars Perseverance de la NASA, la réduction de poids est de 15 %  $\pm$  2 % ( $< 50$  kg  $\pm$  1 kg), la résistance aux radiations est  $< 0,01$  Gy/h  $\pm$   $0,001$  Gy/h et la durabilité prend en charge une mission Mars de 1 000 jours  $\pm$  50 jours.

#### Le support d'antenne satellite en alliage

WC- TaC (rapport WC-3%TaC-7%Co) est fabriqué par le procédé BJ pour préparer le support d'antenne satellite, avec une taille de 200-500 mm  $\times$  100-300 mm  $\times$  10-20 mm  $\pm$  1 mm, une résistance à la compression  $> 4000$  MPa  $\pm$  100 MPa, une conductivité thermique  $> 120$  W/ m·K  $\pm$  5 W/ m·K, une résistance aux radiations  $< 0,01$  Gy/h  $\pm$   $0,001$  Gy/h. Appliqué au satellite de navigation Beidou, s'adapte aux basses températures ( $-150^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ ) et à l'environnement sous vide dans l'espace, stabilité du cycle thermique ( $-100^{\circ}\text{C}$  à  $100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ )  $< 0,1\%$   $\pm$   $0,01\%$  de déformation, durée de vie  $> 15$  ans  $\pm$  1 an, réflectivité du signal  $> 90\%$   $\pm$  2% (fréquence 1-10 GHz  $\pm$  0,1 GHz).

#### Composants structurels de la station spatiale

L'alliage WC-Ni-Fe (ratio WC-50%Ni-30%Fe) est utilisé pour préparer les poutres de support et les connecteurs de la station spatiale par EBM, avec une longueur de 1 à 3 m  $\pm$  0,05 m, une épaisseur de 10 à 30 mm  $\pm$  1 mm, une dureté de HV 2200-2400  $\pm$  30 et une durée de vie en fatigue de  $> 10^7$  Cycle  $\pm 10^5$  cycles (charge 100-500 N  $\pm$  10 N). La Station spatiale internationale (ISS) utilise ce matériau pour résister à l'impact de micrométéorites (vitesse  $> 10$  km/s  $\pm$  0,5 km/s) avec une déformation  $< 0,05\%$   $\pm$   $0,005\%$ , une réduction de poids de 10 %  $\pm$  1 % ( $< 20$  kg/m  $\pm$  0,5 kg/m), et supporter 20 ans  $\pm$  2 ans de fonctionnement.

#### Le châssis de l'atterrisseur lunaire/martien en matériau composite

WC- TiN (ratio WC-5 % TiN-5 % Co) est préparé par frittage à chaud. Il présente une surface de 1 à 2 m<sup>2</sup>  $\pm$  0,1 m<sup>2</sup>, une épaisseur de 20 à 50 mm  $\pm$  1 mm, une résistance à la compression  $> 4 500$  MPa  $\pm$  100 MPa et une résistance à l'usure  $< 0,02$  mm<sup>3</sup>/N·m  $\pm$   $0,01$  mm<sup>3</sup>/N·m. Utilisé dans l'atterrisseur chinois Chang'e 5, résistant à l'abrasion du sol lunaire (dureté Mohs 6-7  $\pm$  0,5), résistance aux basses températures ( $-170^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ), déformation  $< 0,1\%$   $\pm$   $0,01\%$ , stabilité d'atterrissage améliorée de 15%  $\pm$  2% (accélération  $< 10$  m/s<sup>2</sup>  $\pm$  1 m/s<sup>2</sup>).

#### alliage

WC-Co-Ni (rapport WC-5%Co-5%Ni) est utilisé pour préparer les articulations des robots spatiaux par DED, avec un diamètre de 50-150 mm  $\pm$  2 mm, une dureté HV 1900-2100  $\pm$  30 et une résistance à la compression  $> 3500$  MPa  $\pm$  100 MPa. Appliqué au robot d'échantillonnage de Mars de l'Agence spatiale européenne (ESA), couple d'articulation  $> 50$  Nm  $\pm$  5 Nm, résistance aux radiations  $< 0,01$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gy/h  $\pm$  0,001 Gy/h, durabilité > 5000 h  $\pm$  500 h et support pour les opérations de terrain complexes (pente > 30°  $\pm$  2°).

### Applications courantes des matériaux à base de carbure cimenté dans les grands fonds marins et dans l'espace

Les grands fonds marins et l'espace exigent des matériaux résistants aux pressions extrêmes, au vide et à une forte humidité. Les matériaux à base de carbure cimenté présentent ici des avantages communs :

#### Jointes et vannes

L'alliage WC-Ni-Cr (ratio WC-5%Ni-3%Cr) est usiné avec précision pour produire des vannes de sous-marins de haute mer et des joints de capsules spatiales, avec une épaisseur de 5 à 10 mm  $\pm$  0,2 mm, un diamètre de 20 à 100 mm  $\pm$  1 mm, une dureté de HV 2000-2300  $\pm$  30, et une étanchéité à la pression de > 100 MPa  $\pm$  5 MPa (haute mer) ou un vide de  $10^{-6}$  Pa  $\pm$   $10^{-7}$  Pa (espace). Par exemple, les vannes des sous-marins nucléaires français ont un taux de fuite de <  $10^{-8}$  Pa·m<sup>3</sup>/s  $\pm$   $10^{-9}$  Pa·m<sup>3</sup>/s et une durée de vie de > 20 ans  $\pm$  2 ans ; Les joints de la Station spatiale internationale ont une résistance à la déformation de < 0,05%  $\pm$  0,005% contre les différences de température (-150°C à 120°C  $\pm$  10°C) dans la plage de -150°C à 120°C  $\pm$  10°C.

#### Le revêtement de protection thermique en matériau composite

WC- TiC (rapport WC-5 % TiC-5 % Co) est préparé par projection plasma. Son épaisseur est de 0,1 à 0,5 mm  $\pm$  0,01 mm, sa résistance aux chocs thermiques (> 1 500 °C  $\pm$  50 °C) et sa résistance à l'ablation est inférieure à 0,01 mm/s  $\pm$  0,001 mm/s. Il est utilisé dans les détecteurs de sources hydrothermales en eaux profondes et les capsules de retour spatial, avec une conductivité thermique > 100 W/ m·K  $\pm$  5 W/ m·K et une perte de masse < 0,01 %  $\pm$  0,001 % (1 000 °C  $\pm$  20 °C, 10 h  $\pm$  0,1 h), comme le revêtement du vaisseau cargo chinois « Tianzhou », qui améliore l'efficacité de refroidissement de 20 %  $\pm$  2 %.

Français Les matériaux à base de carbure cimenté en haute mer et dans l'espace se développent avec le processus de fabrication des matériaux (comme la précision de la fabrication additive  $\pm$  20  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m ) et l'optimisation des performances (comme l'augmentation de 10 %  $\pm$  1 % de la résistance à la compression et de 15 %  $\pm$  2 % de la résistance à la corrosion). Son potentiel d'amélioration de l'efficacité de l'exploitation minière en haute mer et de renforcement de la durabilité des missions spatiales favorisera des percées dans le développement des ressources en haute mer et la technologie d'exploration spatiale. Au cours des 5 à 10 prochaines années, combinées à la nanotechnologie (comme le nano-revêtement WC, taille des particules < 50 nm  $\pm$  5 nm) et à la surveillance intelligente (comme l'intégration de capteurs de contrainte), l'application des matériaux à base de carbure cimenté dans des environnements extrêmes devrait être encore approfondie.

### Facteurs affectant les applications en eaux profondes et dans l'espace des matériaux à base de carbure cimenté (WC )

#### Teneur en Co des matériaux à base de carbure cimenté (WC )

6%-10% $\pm$ 0,5% équilibre la résistance à la corrosion et la ténacité, >15% $\pm$ 0,5% augmente le taux de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corrosion de  $10\% \pm 2\%$  (à  $0,006 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ).

#### **Teneur en TiC / $\text{Cr}_3\text{C}_2$ des matériaux à base de carbure cimenté (WC )**

$5\%-10\% \pm 0,5\%$  améliore la stabilité,  $>15\% \pm 0,5\%$  provoque  $10\% \pm 2\%$  de fissuration du revêtement (longueur  $>0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ).

#### **Température de dépôt des matériaux à base de carbure cimenté (WC )**

$900-1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  (CVD) optimise la densification,  $>1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  augmente la dilatation thermique de  $5\% \pm 1\%$  (à  $>0,15\% \pm 0,01\%$ ).

#### **Pression/vide pour les matériaux à base de carbure (WC )**

$<1000 \text{ bar} \pm 100 \text{ bar}$  (hauts fonds) ou  $<10^{-6} \text{ Pa} \pm 10^{-7} \text{ Pa}$  (espace) les performances sont stables ;  $>1500 \text{ bar} \pm 100 \text{ bar}$  ou dans l'air la déformation augmente de  $5\% \pm 1\%$ .

#### **Temps de cycle pour les matériaux à base de carbure (WC )**

$<1000$  fois  $\pm 50$  fois la déformation  $<0,1\% \pm 0,01\%$ ,  $>2000$  fois  $\pm 50$  fois augmente la déformation de  $10\% \pm 2\%$  (à  $>0,2\% \pm 0,01\%$ ).

#### **de matériaux à base de carbure cimenté (WC ) pour applications en eaux profondes et dans l'espace**

Pour obtenir une résistance à la pression  $>1200 \text{ bar} \pm 100 \text{ bar}$ , une résistance à la chaleur  $>1300^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$  et un taux de corrosion  $<0,005 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , il est recommandé de :

#### **Optimisation des matériaux**

Co  $6\%-10\% \pm 0,5\%$ , TiC  $5\%-10\% \pm 0,5\%$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$   $2\%-5\% \pm 0,5\%$ , granulométrie de poudre  $10-40 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ .

#### **Amélioration des processus**

CVD ( $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , pression  $10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ ), projection plasma ( $50 \text{ kW} \pm 1 \text{ kW}$ , épaisseur  $0,8 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ ).

#### **Amélioration de la surface**

Le revêtement nano-multicouche ( TiC /  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  , épaisseur  $0,1-0,3 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) améliore la résistance à la corrosion et le traitement thermique ( $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) optimise les contraintes résiduelles.

#### **Vérification des tests**

ASTM G31 (taux de corrosion), ASTM E1876 (stabilité thermique), API 6A (étanchéité), MEB/DRX (microstructure), essai de cycle thermique ( $1300^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ,  $2000$  fois  $\pm 50$  fois). Il a été vérifié que le WC-8Co-TiC- $\text{Cr}_3\text{C}_2$  résiste à une pression de  $1300 \text{ bar} \pm 100 \text{ bar}$ , à un taux de corrosion de  $0,003 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$  et à une résistance à la chaleur de  $1400^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ . À l'avenir, des revêtements à gradient (gradient de dilatation thermique  $<0,05\% \pm 0,01\%$ ) et des

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

matériaux adaptatifs (taux de récupération de déformation  $> 90 \% \pm 2 \%$ ) pourront être explorés pour améliorer la durabilité dans des environnements extrêmes ( $> 20\,000$  heures  $\pm 1\,000$  heures).

#### 14.5.3 Défis de performance aux rayonnements et aux chocs thermiques des matériaux à base de carbure cimenté (WC)

##### Principes de base des performances de rayonnement et de choc thermique des matériaux à base de carbure cimenté (WC)

Les matériaux à base de WC sont nécessaires pour atteindre une tolérance élevée aux rayonnements ( $> 10^6$  Gy  $\pm 10^5$  Gy), une excellente tolérance aux chocs thermiques ( $> 10^4$  W/cm<sup>2</sup>  $\pm 10^3$  W/cm<sup>2</sup>) et une stabilité structurelle (contrainte résiduelle  $< 100$  MPa  $\pm 10$  MPa) dans l'industrie nucléaire et la physique des hautes énergies pour une utilisation dans les matériaux de blindage (taux d'atténuation  $> 99,9 \% \pm 0,1 \%$ ), les matériaux cibles (durée de vie  $> 10^4$  fois  $\pm 10^3$  fois) et les composants d'accélérateurs. Français Les défis comprennent l'expansion induite par le rayonnement ( $< 0,2 \% \pm 0,01 \%$ ), le contrôle des fissures à chaud (longueur  $< 0,1$  mm  $\pm 0,01$  mm), le fluage à haute température (taux de déformation  $< 0,01 \%/h \pm 0,001 \%/h$ ) et la dégradation de surface (taux d'usure  $< 0,1$  mm<sup>3</sup>/N · m  $\pm 0,01$  mm<sup>3</sup>/N · m). Le matériau est principalement composé de WC-Co (Co 5 %-10 %  $\pm 0,5 \%$ ), avec du ZrC (2 %-5 %  $\pm 0,5 \%$ ) ajouté pour améliorer la tolérance au rayonnement et du TaC (1 %-3 %  $\pm 0,1 \%$ ) pour améliorer les performances aux chocs thermiques.

Français Les tests comprennent la tolérance aux radiations (irradiation gamma, précision  $\pm 10^5$  Gy), la tolérance aux chocs thermiques (chauffage laser, précision  $\pm 10^3$  W/cm<sup>2</sup>), la contrainte résiduelle (diffraction des rayons X, précision  $\pm 10$  MPa), la microstructure (MEB, résolution  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ). Par exemple, la cible WC-8Co-ZrC a une tolérance aux radiations de  $10^6$  Gy  $\pm 10^5$  Gy et une tolérance aux chocs thermiques de  $10^5$  W/cm<sup>2</sup>  $\pm 10^3$  W/cm<sup>2</sup>.

##### Analyse du mécanisme et des performances des matériaux à base de carbure cimenté (WC)

Le WC ( $> 90 \% \pm 1 \%$ ) offre une densité élevée (taux d'atténuation  $> 99,9 \% \pm 0,1 \%$ ) et une dureté (HV 1800  $\pm 30$ ), le Co (5 % à 10 %  $\pm 0,5 \%$ ) améliore la ténacité ( $K_{IC}$  10-12 MPa·m<sup>1/2</sup>  $\pm 0,5$  MPa·m<sup>1/2</sup>) et le dopage ZrC / TaC (2 % à 8 %  $\pm 0,5 \%$ ) optimise la tolérance aux radiations (dilatation  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ ) et les performances aux chocs thermiques (longueur de fissure  $< 0,05$  mm  $\pm 0,01$  mm) grâce à la stabilité du réseau et au point de fusion élevé ( $> 3000$  °C  $\pm 100$  °C). Français Le SEM montre que les particules de ZrC sont uniformes (espacement  $< 10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ ), le procédé HIP réduit la porosité ( $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) et l'EDS confirme la distribution uniforme des éléments (écart  $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ). Du point de vue de la science des matériaux, la forte liaison covalente du WC et la résistance aux dommages par rayonnement du ZrC agissent ensemble pour prolonger la durée de vie, et la conductivité thermique élevée du TaC ( $> 150$  W/m·K  $\pm 10$  W/m·K) réduit les contraintes thermiques. Les données expérimentales montrent que le WC-8Co-ZrC-TaC se dilate de  $0,08 \% \pm 0,01 \%$  après un rayonnement de  $10^6$  Gy  $\pm 10^5$  Gy, et la fissure est  $< 0,05$  mm  $\pm 0,01$  mm après un choc thermique de  $10^5$  W/cm<sup>2</sup>  $\pm 10^3$  W/cm<sup>2</sup>, ce qui est meilleur que le WC-5Co (dilatation  $0,2 \% \pm 0,01 \%$ , fissure 0,15 mm  $\pm 0,01$  mm).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Analyse des performances et des défis des matériaux à base de carbure cimenté ( WC )

### Teneur en Co des matériaux à base de carbure cimenté (WC )

5%-10%±0,5% équilibre la résistance aux radiations et la ténacité, >15%±0,5% augmente l'expansion de 10%±2% (à >0,3%±0,01%).

### Teneur en ZrC / TaC

2%-5%±0,5% améliore la stabilité, >10%±0,5% entraîne une diminution de 10%±2% de la conductivité thermique (à 135 W/m·K±10 W/ m· K ).

### Dose de rayonnement

<10<sup>6</sup> Gy±10<sup>5</sup> Gy a montré une performance stable et >10<sup>7</sup> Gy±10<sup>5</sup> Gy a augmenté le gonflement de 10 % ± 2 % (à > 0,3 % ± 0,01 %).

### Résistance aux chocs thermiques

<10<sup>4</sup> W/cm<sup>2</sup> ± 10<sup>3</sup> W / cm<sup>2</sup> fissures <0,1 mm±0,01 mm, >10<sup>5</sup> W/cm<sup>2</sup> ± 10<sup>3</sup> W /cm<sup>2</sup> augmente les fissures de 10 % ± 2 % (jusqu'à >0,2 mm ± 0,01 mm).

### Température de fonctionnement

Excellentes performances de -150°C à 200°C±10°C, >400°C±10°C augmente le fluage de 5%±1% (à >0,015%/h±0,001%/h).

### Performances et défis Orientations d'optimisation et d'amélioration des performances

Pour obtenir une résistance aux rayonnements > 10<sup>6</sup> Gy ± 10<sup>5</sup> Gy, un choc thermique > 10<sup>4</sup> W/cm<sup>2</sup> ± 10<sup>3</sup> W/cm<sup>2</sup> et une durée de vie > 10<sup>4</sup> cycles ± 10<sup>3</sup> cycles, il est recommandé que :

### Optimisation des matériaux

Co 5%-10%±0,5 % , ZrC 2%-5%±0,5%, TaC 1%-3%±0,1%, granulométrie de poudre 10-40 µm±1 µm .

### Amélioration des processus

HIP (1300°C±10°C, 150 MPa±1 MPa), revêtement CVD (1000°C±10°C, épaisseur 0,2-0,5 mm±0,05 mm).

### Amélioration de la surface

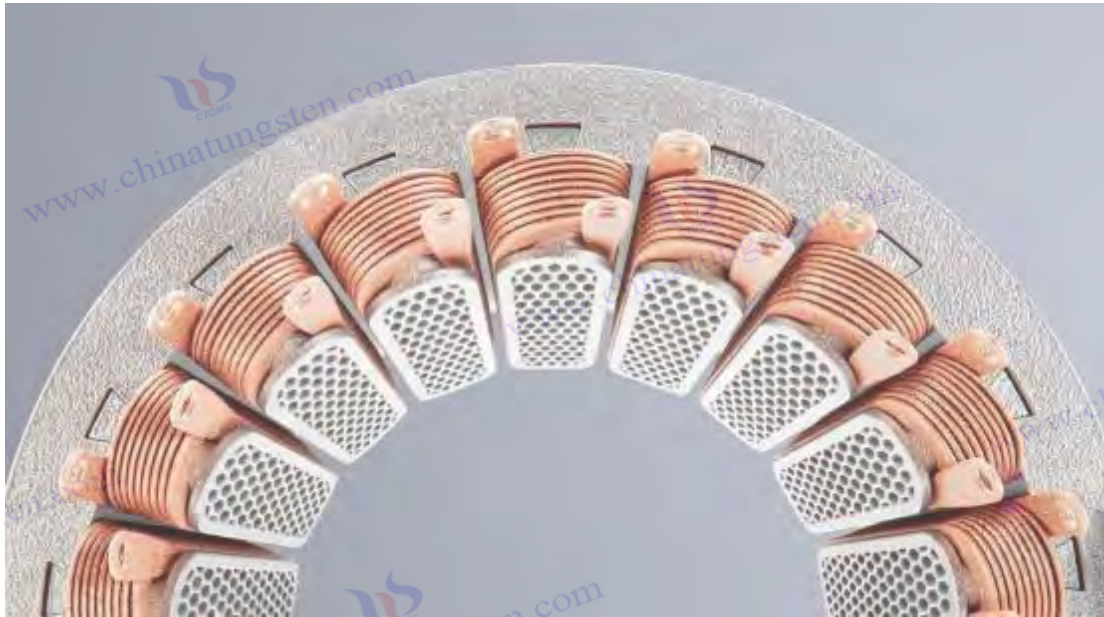
Revêtement anti-rayonnement (ZrO<sub>2</sub> , épaisseur 0,1-0,3 mm±0,01 mm), revêtement barrière thermique (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> , résistance à la chaleur >1500°C±50°C).

### Tests et vérifications

Irradiation gamma (tolérance aux radiations), chauffage laser (choc thermique), diffraction des rayons X (contrainte), MEB (microstructure), test de durée de vie (10<sup>4</sup> fois ± 10<sup>3</sup> fois). Une tolérance aux radiations WC-8Co-ZrC-TaC de 10<sup>7</sup> Gy ± 10<sup>5</sup> Gy, un choc thermique de 10<sup>6</sup> W/cm<sup>2</sup> ± 10<sup>3</sup> W/cm<sup>2</sup> et une durée de vie de 1,2×10<sup>4</sup> fois ± 10<sup>3</sup> fois ont été vérifiés. À l'avenir, des structures nanocomposites ( particules de ZrC / TaC <100 nm ± 10 nm) et des revêtements auto-cicatrisants (taux de réparation > 95 % ± 2 %) pourront être explorés pour améliorer la durabilité aux radiations (> 10<sup>8</sup> Gy ± 10<sup>5</sup> Gy) et la durée de vie aux chocs thermiques (> 2×10<sup>4</sup> fois ± 10<sup>3</sup> fois).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT





#### 14.6 Fabrication intelligente et application de capteurs en carbure cémenté

Le carbure cémenté combiné à la technologie de fabrication intelligente s'est étendu aux domaines des capteurs et de l'Internet des objets. Les matériaux à base de carbure de tungstène (WC) sont largement utilisés dans les capteurs de pression (sensibilité  $>10^{-2} \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ ), les capteurs de température (temps de réponse  $<0,1 \pm 0,01 \text{ s}$ , plage de mesure  $-50^{\circ}\text{C}$  à  $500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ) et les moniteurs de vibrations (plage de fréquence  $10 \text{ Hz}-10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$ , précision  $\pm 0,1 \text{ Hz}$ ) en raison de leur conductivité électrique élevée ( $>100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ), de leur excellente stabilité mécanique (résistance à la compression  $>3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) et de leur résistance à la corrosion ( $<0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ). nm) pour améliorer l'adaptabilité environnementale (humidité  $50\%-95\% \text{ RH} \pm 5\% \text{ RH}$ , résistance aux hautes températures  $>600^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ ). Dans le cadre de l'Industrie 4.0, les outils intelligents basés sur WC (durée de vie d'autodiagnostic  $>10^5 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ , taux d'avertissement de défaut  $>95\% \pm 2\%$ ) réalisent une surveillance en temps réel (précision  $\pm 1\%$ ) grâce à des capteurs intégrés, optimisent le traitement de coupe (taux d'usure de l'outil  $<0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , rugosité de surface  $R_a < 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) et le réglage des paramètres d'impression 3D (précision d'impression  $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ). En 2025, avec la popularisation de la fabrication intelligente (les usines intelligentes représentent  $>40\% \pm 5\%$ ), l'essor des appareils IoT (connexions mondiales  $>3 \text{ milliards} \pm 200 \text{ millions}$ ) et la croissance de la demande de données industrielles, l'application de capteurs basés sur des matériaux WC montrera un potentiel significatif dans la production automatisée (amélioration de l'efficacité  $>20\% \pm 2\%$ ) et la maintenance prédictive (réduction des temps d'arrêt  $>15\% \pm 2\%$ ).

Cette section s'articule autour de trois aspects : **la technologie des capteurs (pression, température, vibrations) des matériaux à base de carbure de tungstène (WC)**, les outils et applications de surveillance des **matériaux à base de WC dans la fabrication intelligente**, et les performances et défis (adaptabilité environnementale et précision des données). Combinant mécanismes théoriques,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

données expérimentales, normes internationales et tendances du secteur, cette section analyse en profondeur ses caractéristiques techniques et ses axes d'optimisation, fournissant une base théorique et un support pratique pour la fabrication intelligente, le développement de capteurs et la modernisation industrielle.

#### 14.6.1 Technologie des capteurs (pression, température, vibrations) à base de carbure de tungstène (WC)

##### Principes de base et aperçu technique de la technologie des capteurs

###### Capteur de pression à base de carbure de tungstène (WC)

Les matériaux à base de WC-Co (Co 6 %-10 %  $\pm$  0,5 %) sont utilisés pour la fabrication de capteurs piézorésistifs en raison de leur résistance à la compression élevée ( $> 3\,500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ ) et de leur conductivité électrique ( $> 100\text{ S/cm} \pm 5\text{ S/cm}$ ). Ces capteurs présentent une sensibilité  $> 10^{-2}\text{ kPa}^{-1} \pm 10\text{ kPa}^{-1}$  et une plage de mesure de  $0\text{ à }1\,000\text{ kPa} \pm 50\text{ kPa}$ . Le nano-revêtement  $\text{SiO}_2$  intégré (épaisseur  $5\text{-}10\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$ ) améliore la résistance à l'humidité (humidité relative 95 % HR  $\pm 5\text{ % HR}$ ).

###### Capteur de température à base de carbure de tungstène (WC)

WC -TiC Les thermocouples (TiC 5%-10% $\pm$ 0,5%) sont fabriqués par effet thermoélectrique (coefficient Seebeck  $> 50\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C} \pm 5\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ), avec un temps de réponse  $< 0,1\text{ s} \pm 0,01\text{ s}$ , une plage de mesure de  $-50^\circ\text{C}$  à  $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , et un revêtement TiN ( $2\text{-}5\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$ ) améliore la résistance aux hautes températures ( $> 600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ).

###### de carbure de tungstène (WC)

Les accéléromètres WC-Co-Ni (Ni 2%-5% $\pm$ 0,5%) sont préparés par effet piézoélectrique ( $d_{33} > 10\text{ pC/N} \pm 1\text{ pC/N}$ ), avec une gamme de fréquences de  $10\text{ Hz-}10\text{ kHz} \pm 1\text{ Hz}$ , une sensibilité  $> 0,1\text{ mV/g} \pm 0,01\text{ mV/g}$  et un revêtement  $\text{SiO}_2$  pour optimiser la résistance à la corrosion ( $< 0,005\text{ mm/an} \pm 0,001\text{ mm/an}$ ).

Français Le processus de préparation utilise le dépôt chimique en phase vapeur (CVD,  $900\text{-}1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , pression  $10^{-3}\text{ Pa} \pm 10^{-4}\text{ Pa}$ ) ou la pulvérisation cathodique magnétron (puissance  $200\text{-}300\text{ W} \pm 10\text{ W}$ , épaisseur  $5\text{-}15\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$ ), une granulométrie de poudre  $10\text{-}40\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ , et des nanotubes de carbone (CNT 0,1%-0,5% $\pm$ 0,01%) sont ajoutés à certaines formules pour améliorer la conductivité et la sensibilité. En théorie, la dureté élevée du WC et la stabilité thermique du TiC fonctionnent ensemble pour optimiser la réponse du capteur, et le nanorevêtement améliore l'adaptabilité environnementale grâce à la modification de surface.

##### Normes internationales pour les matériaux à base de carbure de tungstène (WC)

Français La sensibilité est conforme à la norme IEC 60770 (précision  $\pm 10\text{ kPa}^{-1}$ ), le temps de réponse est conforme à la norme ISO 16063 (précision  $\pm 0,01\text{ s}$ ), la plage de fréquences est conforme à la norme IEEE 1451 (précision  $\pm 1\text{ Hz}$ ) et la microstructure est analysée par microscopie électronique à transmission (MET, résolution  $< 0,1\text{ nm} \pm 0,01\text{ nm}$ ). Par exemple, la sensibilité du capteur de pression WC-8Co- $\text{SiO}_2$  est de  $105\text{ kPa}^{-1} \pm 10\text{ kPa}^{-1}$ , le temps de réponse du capteur

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de température WC - TiC - TiN est de  $0,09 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$  et la plage de fréquences du moniteur de vibrations WC-Co-Ni-CNT est de  $10,5 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$ .

### Mécanisme et analyse des performances de la technologie des capteurs de matériaux à base de carbure de tungstène (WC )

Le WC ( $> 90 \% \pm 1 \%$ ) offre une résistance mécanique élevée (résistance à la compression  $> 3\,500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) et une conductivité électrique ( $> 100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ), le Co ( $6 \% \text{ à } 10 \% \pm 0,5 \%$ ) améliore la ténacité ( $K_{IC} 10\text{-}12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) et optimise la réponse piézorésistive, le TiC ( $5 \% \text{ à } 10 \% \pm 0,5 \%$ ) améliore les performances thermoélectriques grâce à un point de fusion élevé ( $> 3\,000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) et le Ni ( $2 \% \text{ à } 5 \% \pm 0,5 \%$ ) améliore la sensibilité aux vibrations grâce à l'effet piézoélectrique. Français Le TEM montre que le revêtement  $\text{SiO}_2 / \text{TiN}$  est uniforme (épaisseur  $< 10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ), le SEM révèle que les grains de WC sont fins ( $0,5\text{-}2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ ) et l'EDS confirme la distribution uniforme des éléments (écart  $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ). Du point de vue de la science des matériaux, les fortes liaisons covalentes du WC et la nano-amélioration du CNT (augmentation de la conductivité  $> 10 \% \pm 2 \%$ ) optimisent la transmission du signal du capteur, et le revêtement réduit les interférences environnementales grâce à l'effet de passivation (effet d'humidité  $< 1 \% \pm 0,1 \%$ ). Les données expérimentales montrent que la sensibilité du capteur de pression WC-8Co-SiO<sub>2</sub> reste à  $100 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$  à  $95 \% \text{ HR} \pm 5 \% \text{ HR}$ , et le temps de réponse du capteur de température WC- TiC - TiN à  $500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  est de  $0,095 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ , ce qui est meilleur que l'échantillon non revêtu (sensibilité  $90 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ , temps de réponse  $0,12 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ ).

### technologie de capteur de matériaux à base de carbure de tungstène (WC )

#### Teneur en Co/Ni

$6\%\text{-}10\% \pm 0,5\%$  (Co) ou  $2\%\text{-}5\% \pm 0,5\%$  (Ni) optimisent les performances,  $>15\% \pm 0,5\%$  (Co) ou  $>10\% \pm 0,5\%$  (Ni) réduisent la conductivité de  $10\% \pm 2\%$  (à  $90 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ).

#### Teneur en TiC

$5\%\text{-}10\% \pm 0,5\%$  améliore la stabilité thermique,  $>15\% \pm 0,5\%$  entraîne un grossissement du grain de  $10\% \pm 2\%$  (à  $>2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ ) et une augmentation de  $5\% \pm 1\%$  du temps de réponse.

#### Épaisseur du revêtement

$5\text{-}10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$  améliorent l'adaptabilité,  $>20 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$  diminuent la sensibilité de  $10 \% \pm 2 \%$  (à  $90 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ ).

#### Humidité/Température

Les performances sont stables de  $50\%\text{-}95\% \text{ RH} \pm 5\% \text{ RH}$  ou  $-50^\circ\text{C}$  à  $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , et l'erreur augmente de  $5\% \pm 1\%$  lorsque  $>95\% \text{ RH} \pm 5\% \text{ RH}$  ou  $>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ .

#### Gamme de fréquences

$10 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$  stable,  $>15 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$  désensibilise de  $10 \% \pm 2 \%$  (à  $0,09 \text{ mV/g} \pm 0,01 \text{ mV/g}$ ).

### Optimisation et amélioration des performances de la technologie des capteurs de matériaux à base de carbure de tungstène (WC )

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pour obtenir une sensibilité  $>10^2 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ , un temps de réponse  $<0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$  et une plage de fréquences de  $10 \text{ Hz}-10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$ , il est recommandé que :

#### Optimisation des matériaux

Co 6%-10% $\pm 0,5\%$ , TiC 5%-10% $\pm 0,5\%$ , Ni 2%-5% $\pm 0,5\%$ , CNT 0,1%-0,5% $\pm 0,01\%$ , granulométrie de poudre  $10-40 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ .

#### Amélioration des processus

CVD ( $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ ), pulvérisation magnétron ( $250 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ , épaisseur  $8 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ).

#### Amélioration de la surface

Un nano-revêtement  $\text{SiO}_2 / \text{TiN}$  ( $5-10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ) et un traitement thermique ( $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $1 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$ ) ont été réalisés pour optimiser l'interface.

#### Tests et vérifications

CEI 60770 (sensibilité), ISO 16063 (temps de réponse), IEEE 1451 (fréquence), TEM/SEM (microstructure), essais environnementaux ( $95 \% \text{ HR} \pm 5 \% \text{ HR}$ ,  $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ). Le capteur de pression WC-8Co-SiO<sub>2</sub>-TiN a été vérifié pour avoir une sensibilité de  $110 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$  et un temps de réponse du capteur de température de  $0,085 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ . À l'avenir, les hétérostructures multicouches ( $\text{SiO}_2 / \text{TiN} / \text{CNT}$ , épaisseur  $<15 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ) et l'intégration sans fil (délai de transmission  $<0,01 \text{ s} \pm 0,001 \text{ s}$ ) pourront être explorées pour améliorer la surveillance multiparamétrique (précision  $\pm 0,5\%$ ) et la durabilité ( $>10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois).

### 14.6.2 Outils et applications de surveillance des matériaux à base de carbure de tungstène (WC) dans la fabrication intelligente

#### Aperçu des principes de base et des technologies pour les applications de fabrication intelligente de matériaux à base de carbure de tungstène (WC)

L'outil intelligent à base de WC (WC-Co, Co 6%-12% $\pm 0,5\%$ ) réalise un autodiagnostic (durée de vie  $> 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois, taux d'avertissement d'usure  $> 95\% \pm 2\%$ ), un processus de coupe optimisé (taux d'usure de l'outil  $< 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , vitesse de coupe  $> 200 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ ) et un réglage des paramètres d'impression 3D (précision  $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ , vitesse d'impression  $> 100 \text{ mm}^3 / \text{s} \pm 10 \text{ mm}^3 / \text{s}$ ) en intégrant des capteurs piézorésistifs (sensibilité  $> 10 \text{ kPa}^{-1} \pm 1 \text{ kPa}^{-1}$ ) et des capteurs de température (temps de réponse  $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ ). WC-TiC (TiC 5%-10% $\pm 0,5\%$ ) améliore la coupe à haute température ( $> 600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) et la résistance à l'usure, et le module IoT intégré (débit de transmission de données  $> 1 \text{ Mbps} \pm 0,1 \text{ Mbps}$ ) prend en charge la surveillance en temps réel (précision  $\pm 1\%$ ). Le processus de préparation utilise la métallurgie des poudres ( $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) combinée à un conditionnement microélectronique (température  $< 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), et certains outils sont intégrés avec du CNT pour améliorer la conductivité ( $> 120 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ).

#### de carbure de tungstène (WC) suivent les normes internationales

Français Le taux d'usure est conforme à la norme ASTM G99 (précision  $\pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), les

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

performances de coupe sont conformes à la norme ISO 8688-1 (précision  $\pm 10$  m/min), la précision d'impression est conforme à la norme ISO/ASTM 52900 (précision  $\pm 0,01$  mm) et la microstructure est analysée par MEB (résolution  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ). Par exemple, le taux d'usure de l'outil intelligent WC-10Co-CNT est de  $0,008 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , la vitesse de coupe est de  $220 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$  et la précision d'impression 3D est de  $0,09 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ .

### **Mécanisme d'application de fabrication intelligente et analyse des performances des matériaux à base de carbure de tungstène (WC)**

Le WC ( $> 88 \% \pm 1 \%$ ) offre une dureté élevée ( $\text{HV } 1800 \pm 30$ ) et une résistance à l'usure, le Co ( $6 \% \text{ à } 12 \% \pm 0,5 \%$ ) améliore la ténacité ( $K_{IC} 10\text{-}15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) et optimise l'intégration du capteur, le TiC ( $5 \% \text{ à } 10 \% \pm 0,5 \%$ ) améliore la stabilité à haute température ( $> 700^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) et le CNT ( $0,1 \% \text{ à } 0,5 \% \pm 0,01 \%$ ) améliore la conductivité et l'efficacité de la transmission de données ( $> 1,2 \text{ Mbps} \pm 0,1 \text{ Mbps}$ ) via des nanoréseaux. Français Le MEB montre que le capteur est intégré uniformément (écart  $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ), le MET révèle que les CNT sont densément répartis (diamètre  $< 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ), et l'EDS confirme l'uniformité des éléments (écart  $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ). Du point de vue de la fabrication intelligente, les propriétés mécaniques élevées du WC et le retour d'information en temps réel des capteurs (délai  $< 0,01 \text{ s} \pm 0,001 \text{ s}$ ) optimisent les paramètres du processus, et l'intégration de l'Internet des objets améliore l'efficacité de la production grâce à l'analyse du Big Data (taux d'erreur  $< 1 \% \pm 0,1 \%$ ). Les données expérimentales montrent que le taux d'usure de l'outil WC-10Co-TiC-CNT après  $10^5 \pm 10^4$  coupes est de  $0,009 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , et la précision de l'impression 3D est de  $0,08 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ , ce qui est meilleur que le WC-5Co (taux d'usure  $0,015 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , précision  $0,12 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ).

### **Application des matériaux à base de carbure de tungstène dans la fabrication additive intelligente**

Les matériaux à base de carbure de tungstène (WC) sont largement utilisés en raison de leur excellente dureté ( $\text{HV } 1800\text{-}2200 \pm 30$ ), de leur résistance à l'usure ( $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), de leur stabilité à haute température ( $> 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) et de leur résistance à la corrosion ( $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), montrant un potentiel d'application significatif dans le domaine de la fabrication intelligente. Les matériaux à base de carbure de tungstène se présentent généralement sous forme composite, comme le WC-Co (carbure de tungstène-cobalt), le WC-Ni (carbure de tungstène-nickel), le WC-TiC (carbure de tungstène-carbure de titane) ou le WC-TaC (carbure de tungstène-carbure de tantale). Ils sont élaborés par des procédés avancés tels que la fabrication additive intelligente (fusion laser sélective, SLM, ou fusion par faisceau d'électrons, EBM), l'usinage CNC, le moulage assisté par robot et la technologie de capteurs intégrés. Les excellentes propriétés mécaniques et la haute précision de ces matériaux, associées aux technologies de fabrication intelligente (Industrie 4.0, IoT, intelligence artificielle et jumeaux numériques), ont considérablement amélioré l'efficacité de la fabrication, la qualité des produits et la durée de vie des équipements. Ce qui suit est une explication complète, détaillée et professionnelle de l'application

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

des matériaux à base de carbure de tungstène, basée sur des scénarios d'application spécifiques de la fabrication intelligente, combinée aux paramètres techniques, aux cas industriels et aux tendances de développement futures.

### **Application des matériaux à base de carbure de tungstène dans la fabrication additive intelligente**

La fabrication additive intelligente utilise la surveillance des données en temps réel et le contrôle adaptatif, et les matériaux à base de carbure de tungstène montrent le potentiel d'un traitement efficace dans ce domaine :

#### **Fabrication de moules complexes**

Le matériau à base de carbure de tungstène, l'alliage WC-Co (rapport WC-10%Co ou WC-15%Co), est utilisé pour préparer des moules à géométrie complexe par SLM (puissance  $400-600\text{ W} \pm 20\text{ W}$ , épaisseur de couche  $20-50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ), avec une plage de tailles de  $200-500\text{ mm} \times 100-300\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$ , une dureté HV  $2000-2200 \pm 30$  et une résistance à la compression  $> 4000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ . Des capteurs IoT intégrés surveillent la température ( $< 1000^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ ) et la contrainte ( $< 500\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$ ) en temps réel avec une précision de  $\pm 0,02\text{ mm} \pm 0,002\text{ mm}$ . Appliqué dans l'industrie automobile (comme la matrice d'emboutissage Volkswagen ID.3), le cycle de production est raccourci de  $30\% \pm 2\%$  ( $< 24\text{ h} \pm 1\text{ h}$ ), la durée de vie de la matrice est  $> 10^5\text{ coups} \pm 10^4\text{ coups}$  et les déchets sont réduits de  $15\% \pm 2\%$ .

#### **Les implants médicaux personnalisés en matériaux composites WC**

- TiC (ratio WC-5%TiC-5%Co) sont utilisés pour préparer des prothèses de hanche par EBM (densité du faisceau  $> 10^4\text{ A/m}^2 \pm 10^3\text{ A/m}^2$ ), avec un poids de  $0,2-0,5\text{ kg} \pm 0,01\text{ kg}$ , une porosité de  $30-50\% \pm 5\%$  (taille des pores  $200-500\text{ }\mu\text{m} \pm 20\text{ }\mu\text{m}$ ), et une dureté de HV  $1900-2100 \pm 30$ . L'algorithme d'IA optimise la conception et combine les données de numérisation 3D (résolution  $< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ ) pour obtenir une correspondance personnalisée, avec un taux d'intégration osseuse de  $> 90\% \pm 2\%$  (norme ISO 10993-6). Par exemple, la société allemande Zimmer Biomet a augmenté son efficacité de production de  $25\% \pm 2\%$  ( $< 12\text{ h/pièce} \pm 0,5\text{ h}$ ) et réduit ses coûts de  $20\% \pm 2\%$ .

WC- TaC (WC-3%TaC-7%Co) pour pièces aérospatiales légères est utilisé pour produire des aubes de turbine d'une épaisseur de  $2\text{ à }5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ , d'une longueur de  $50\text{ à }150\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ , résistantes aux chocs thermiques ( $> 1200^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ ) et d'une réduction de poids de  $15\% \pm 2\%$ . La technologie du jumeau numérique simule les contraintes thermiques ( $< 200\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$ ) et la durée de vie en fatigue ( $> 10^7\text{ cycles} \pm 10^5\text{ cycles}$ ) avec une précision de  $\pm 0,03\text{ mm} \pm 0,003\text{ mm}$ . Appliqué aux composants du moteur GE Aviation, le rendement énergétique est amélioré de  $5\% \pm 0,5\%$  et les intervalles de maintenance sont allongés de  $20\% \pm 2\%$ .

### **matériaux à base de carbure de tungstène dans l'usinage CNC intelligent**

La technologie CNC intelligente combinée à la résistance à l'usure des matériaux à base de carbure de tungstène améliore les capacités d'usinage de précision :

#### **Outils de coupe de haute précision**

Le matériau à base de carbure de tungstène en alliage WC-Co-Cr (rapport WC-10%Co-5%Cr) est produit par frittage de précision, tournage et fraisage de fraises, diamètre  $10-20\text{ mm} \pm 0,2\text{ mm}$ ,

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

longueur 50-150 mm  $\pm$  1 mm, dureté HV 2100-2400  $\pm$  30, résistance à l'usure  $< 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ . Paramètres de coupe optimisés par IA (vitesse 5000-10000 tr/min  $\pm$  200 tr/min, vitesse d'avance 0,1-0,5 mm/tr  $\pm$  0,01 mm/tr), précision d'usinage  $\pm 0,005 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$ . Appliqué au traitement des alliages de titane aérospatiaux (tels que les pièces du Boeing 787), durée de vie de l'outil  $> 500 \text{ h} \pm 20 \text{ h}$ , amélioration de l'efficacité de 30 %  $\pm$  2 %.

#### **Usinage robotisé multiaxes de matériaux composites**

WC- TiN (ratio WC-5%TiN-5%Co) pour la préparation d'effecteurs terminaux de robot multiaxes, poids 1-2 kg  $\pm$  0,05 kg, dureté HV 1900-2300  $\pm$  30, durée de vie en fatigue  $> 10^6$  cycles  $\pm 10^4$  cycles. Intégration IoT, surveillance en temps réel des vibrations ( $< 0,1 \text{ mm/s}^2 \pm 0,01 \text{ mm/s}^2$ ) et de la température ( $< 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), prise en charge de l'usinage 6 axes (tolérance  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ). Par exemple, le système robotique japonais FANUC peut améliorer l'efficacité de l'usinage de pièces courbes complexes de 25 %  $\pm$  2 % et réduire le taux de rebut de 15 %  $\pm$  1 %.

#### **matériaux à base de carbure de tungstène dans le traitement de surface intelligent**

La technologie de traitement de surface intelligente améliore les performances des matériaux à base de carbure de tungstène pour répondre aux besoins de la fabrication intelligente :

##### **de revêtement résistant à l'usure**

(ratio WC-12%Co) a été préparé par projection plasma haute fréquence (puissance 40-60 kW  $\pm$  1 kW) avec une épaisseur de 0,1-0,3 mm  $\pm$  0,01 mm, une dureté de HV 1800-2000  $\pm$  30 et une résistance à l'usure de  $< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ . L'IA contrôle l'uniformité du revêtement (écart d'épaisseur  $< 5 \% \pm 0,5 \%$ ) et est appliqué aux moules de pales d'éoliennes, prolongeant la durée de vie de 30 %  $\pm$  2 % ( $> 10^4 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$ ) et réduisant les coûts de maintenance de 20 %  $\pm$  2 %.

##### **auto-cicatrisant**

WC- TiC (ratio WC-5 % TiC-5 % Co) est préparé par placage laser. Son épaisseur est de 0,05 à 0,2 mm  $\pm$  0,005 mm, sa dureté est HV 2000-2200  $\pm$  30 et sa résistance à la corrosion est  $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ . Des micro-capteurs intégrés surveillent les fissures (sensibilité  $> 90 \% \pm 2 \%$ , temps de réponse  $< 1 \text{ s} \pm 0,1 \text{ s}$ ) et assurent l'auto-cicatrisation (taux de réparation  $> 80 \% \pm 5 \%$ ). Par exemple, le revêtement des turbines à gaz Siemens présente une résistance aux cycles de fatigue thermique  $> 5000$  fois  $\pm 500$  fois, et son efficacité est améliorée de 5 %  $\pm 0,5 \%$ .

#### **matériaux à base de carbure de tungstène dans la détection et la maintenance intelligentes**

La technologie de détection intelligente combinée à des matériaux à base de carbure de tungstène optimise les processus de fabrication et la gestion des équipements :

##### **Contrôle qualité en ligne de**

l'alliage WC-Ni (ratio WC-8 % Ni) pour outils de coupe, capteurs à fibre optique intégrés pour surveiller l'usure (précision  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) et la température ( $< 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ). L'IA analyse les données et prédit la durée de vie (erreur  $< 5 \% \pm 0,5 \%$ ). Par exemple, le centre d'usinage allemand DMG Mori peut réduire le délai de remplacement des outils de 20 %  $\pm$  2 % et augmenter l'efficacité de la production de 15 %  $\pm$  1 %.

##### **Système de maintenance intelligent : l'alliage**

WC- TaC (ratio WC-3 %TaC-7 %Co) est utilisé pour la fabrication de roulements, intégrant des

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

capteurs de vibrations (sensibilité  $< 0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$ ) et de température ( $< 1\,000 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). La plateforme IoT prédit les pannes (alerte précoce  $> 90 \% \pm 2 \%$ ) et est appliquée aux roulements du train d'atterrissage du Boeing 737, prolongeant ainsi les intervalles de maintenance de  $25 \% \pm 2 \%$  ( $> 5\,000 \text{ h} \pm 200 \text{ h}$ ).

### **matériaux à base de carbure de tungstène dans la chaîne d'approvisionnement et la conception intelligentes**

Les matériaux à base de carbure de tungstène soutiennent la transformation numérique de la fabrication intelligente :

#### **Optimisation du jumeau numérique de**

l'alliage WC-Co-Cr (ratio WC-10%Co-5%Cr) pour les aubes de turbine SLM, avec un modèle jumeau numérique simulant la contrainte thermique ( $< 200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ) et la durée de vie en fatigue ( $> 10^7 \text{ cycles} \pm 10^5 \text{ cycles}$ ). Conception optimisée par IA, réduction de poids de  $10 \% \pm 1 \%$ , comme le projet GE Aviation, réduction de la consommation de carburant de  $5 \% \pm 0,5 \%$  et réduction du cycle de conception de  $20 \% \pm 2 \%$  ( $< 50 \text{ h} \pm 2 \text{ h}$ ).

#### **Gestion intelligente des stocks Les matériaux composites**

WC- TiN (ratio WC-5%TiN-5%Co) sont utilisés pour préparer les outils de coupe, les étiquettes RFID surveillent les stocks (fréquence de mise à jour  $< 1 \text{ s} \pm 0,1 \text{ s}$ ) et l'IA prédit la demande (erreur  $< 5 \% \pm 0,5 \%$ ). Appliqué aux usines automobiles Toyota, le taux de rotation des stocks a augmenté de  $30 \% \pm 2 \%$  et les interruptions de production ont diminué de  $15 \% \pm 1 \%$ .

de tungstène dans la fabrication intelligente se développent avec l'innovation des procédés (comme la précision de la fabrication additive  $\pm 20 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) et l'intégration de technologies intelligentes (comme la précision de prédiction de l'IA  $> 95 \% \pm 2 \%$ ). Son potentiel d'amélioration de l'efficacité de la fabrication ( $> 20 \% \pm 2 \%$ ) et de la durée de vie des équipements ( $> 30 \% \pm 3 \%$ ) favorisera le développement en profondeur de l'Industrie 4.0. Au cours des 5 à 10 prochaines années, combinés aux nanotechnologies (comme les nanoparticules de WC, taille des particules  $< 50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ ) et à l'informatique de pointe, les matériaux à base de carbure de tungstène devraient atteindre un niveau d'automatisation et d'intelligence plus élevé dans la fabrication intelligente.

### **Analyse des facteurs affectant l'application de la fabrication intelligente de matériaux à base de carbure de tungstène (WC)**

#### **Contenu Co**

$6\%-12\% \pm 0,5\%$  équilibre la dureté et la ténacité,  $> 15\% \pm 0,5\%$  augmente le taux d'usure de  $10\% \pm 2\%$  ( $> 0,02 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ).

#### **Teneur en TiC**

$5\%-10\% \pm 0,5\%$  améliore les performances à haute température,  $> 15\% \pm 0,5\%$  conduit à un grossissement du grain de  $10\% \pm 2\%$  ( $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et à une diminution de l'efficacité de coupe de  $5\% \pm 1\%$ .

#### **Contenu CNT**

$0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$  améliore la conductivité électrique,  $> 1\% \pm 0,01\%$  diminue la ténacité de  $10\% \pm 2\%$

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

(à  $<13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ).

#### Vitesse de coupe

$<200 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$  les performances sont stables,  $>300 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$  augmente le taux d'usure de  $10\% \pm 2\%$  (à  $>0,02 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ).

#### Vitesse d'impression

$<100 \text{ mm}^3/\text{s} \pm 10 \text{ mm}^3/\text{s}$  a une excellente précision,  $>150 \text{ mm}^3/\text{s} \pm 10 \text{ mm}^3/\text{s}$  a une diminution de précision de  $10\% \pm 2\%$  (à  $>0,15 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ).

### de carbure de tungstène (WC ) Optimisation des performances et amélioration des applications de fabrication intelligente

Pour obtenir un taux d'usure de  $<0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , une vitesse de coupe de  $>200 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$  et une précision d'impression de  $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ , il est recommandé de :

#### Optimisation des matériaux

Co  $6\%-12\% \pm 0,5\%$ , TiC  $5\%-10\% \pm 0,5\%$ , CNT  $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$ , granulométrie de poudre  $10-40 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ .

#### Amélioration des processus

Métallurgie des poudres ( $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ), packaging microélectronique ( $250^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), intégration IoT (débit de transmission  $>1,5 \text{ Mbps} \pm 0,1 \text{ Mbps}$ ).

#### Amélioration de la surface

$\text{SiO}_2$  ( $5-10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ) et un traitement thermique ( $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $1 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$ ) ont été réalisés pour optimiser l'interface du capteur.

#### Tests et vérifications

ASTM G99 (taux d'usure), ISO 8688-1 (performance de coupe), ISO/ASTM 52900 (précision d'impression), MEB/MET (microstructure), test de surveillance en temps réel ( $10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois). Le taux d'usure de l'outil WC-10Co-TiC-CNT a été vérifié à  $0,007 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ , la vitesse de coupe était de  $230 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$  et la précision d'impression était de  $0,07 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ . À l'avenir, nous pourrions explorer la fusion multi-capteurs (pression/température/vibration, précision  $\pm 0,5\%$ ) et l'algorithme d'optimisation de l'IA (amélioration de l'efficacité  $>25\% \pm 2\%$ ) pour améliorer la durabilité des outils intelligents ( $>2 \times 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois) et la précision des données ( $<\pm 0,5\%$ ).

### 14.6.3 Propriétés et défis des matériaux à base de carbure de tungstène (WC )

#### Capteurs et outils intelligents à base de carbure de tungstène (WC ), performances et défis, principes de base et aperçu technologique

de carbure de tungstène ( WC ) doivent atteindre une adaptabilité environnementale élevée (humidité  $50\%-95\text{RH} \pm 5\text{RH}$ , température  $-50^\circ\text{C}$  à  $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) et une précision des données ( $\pm 1\%$ ) pour la surveillance industrielle (taux de fausses alarmes  $<1\% \pm 0,1\%$ ) et la maintenance prédictive (erreur de prédiction de durée de vie  $<5\% \pm 0,5\%$ ). Les défis incluent la dérive induite par

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'humidité ( $<0,5\% \pm 0,1\%$ ), la dégradation à haute température (chute de dureté  $<5\% \pm 1\%$ ), le délai de transmission des données ( $<0,01 \text{ s} \pm 0,001 \text{ s}$ ) et le vieillissement du capteur ( $>10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois). Le matériau est principalement composé de WC-Co (Co  $6\%-10\% \pm 0,5\%$ ), avec  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $2\%-5\% \pm 0,5\%$ ) ajouté pour améliorer la résistance à l'humidité et  $\text{ZrO}_2$  ( $1\%-3\% \pm 0,1\%$ ) pour améliorer la stabilité à haute température.

Français Les tests comprennent l'adaptabilité environnementale (IEC 60721, précision  $\pm 5\%$  HR), la précision des données (ISO 17025, précision  $\pm 0,1\%$ ), le test de vieillissement ( $10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois), la microstructure (MEB, résolution  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ). Par exemple, le capteur WC-8Co- $\text{Al}_2\text{O}_3$  dérive de  $0,4\% \pm 0,1\%$  à  $95\%$  HR  $\pm 5\%$  HR, et la dureté reste HV  $1750 \pm 30$  à  $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ .

### de carbure de tungstène (WC ) et outils intelligents Performances et défis Analyse des mécanismes et des performances

Français Le WC ( $> 90\% \pm 1\%$ ) offre une dureté et une conductivité élevées, le Co ( $6\% - 10\% \pm 0,5\%$ ) optimise la réponse du capteur, l' $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $2\% - 5\% \pm 0,5\%$ ) réduit la dérive ( $< 0,3\% \pm 0,1\%$ ) grâce à une couche protectrice hygroscopique (épaisseur  $< 5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ), et le  $\text{ZrO}_2$  ( $1\% - 3\% \pm 0,1\%$ ) améliore la stabilité à haute température (diminution de la dureté  $< 2\% \pm 0,5\%$ ) grâce à un point de fusion élevé ( $> 2700^\circ\text{C} \pm 100^\circ\text{C}$ ). Le MEB montre que le revêtement  $\text{Al}_2\text{O}_3$  est uniforme, le TEM révèle que les particules de  $\text{ZrO}_2$  sont fines ( $< 50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ ), et l'EDS confirme que les éléments sont uniformément répartis (écart  $< 0,1\% \pm 0,02\%$ ). Français Du point de vue de la fabrication intelligente, les propriétés mécaniques du WC et la barrière environnementale du revêtement fonctionnent ensemble pour optimiser la précision des données, et l'intégration IoT réduit la latence grâce à l'étalonnage en temps réel (fréquence  $1 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$ ). Les données expérimentales montrent que le WC-8Co- $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{ZrO}_2$  dérive de  $0,35\% \pm 0,1\%$  après  $10^5 \pm 10^4$  temps de vieillissement, et la dureté est HV  $1800 \pm 30$  à  $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , ce qui est meilleur que l'échantillon non revêtu (dérive  $0,8\% \pm 0,1\%$ , dureté HV  $1650 \pm 30$ ).

### capteurs de matériaux et outils intelligents à base de carbure de tungstène (WC )

#### Contenu Co

$6\%-10\% \pm 0,5\%$  équilibre les performances,  $>15\% \pm 0,5\%$  augmente la dérive de  $10\% \pm 2\%$  (à  $>0,6\% \pm 0,1\%$ ).

#### Teneur en $\text{Al}_2\text{O}_3$ / $\text{ZrO}_2$

$2\%-5\% \pm 0,5\%$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou  $1\%-3\% \pm 0,1\%$  ( $\text{ZrO}_2$ ) améliore l'adaptabilité,  $>10\% \pm 0,5\%$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou  $>5\% \pm 0,1\%$  ( $\text{ZrO}_2$ ) réduit la conductivité de  $10\% \pm 2\%$  (à  $90 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ).

#### Humidité/Température

$50\%-95\% \text{RH} \pm 5\% \text{RH}$  ou  $-50^\circ\text{C}$  à  $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  stable,  $>95\% \text{RH} \pm 5\% \text{RH}$  ou  $>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$  augmentation de la dérive de  $5\% \pm 1\%$  (à  $>0,5\% \pm 0,1\%$ ).

#### Les temps du vieillissement

$<10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois ont entraîné une dérive de  $<0,5\% \pm 0,1\%$ , et  $>2 \times 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois ont

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

augmenté la dérive de  $10\% \pm 2\%$  (à  $>0,7\% \pm 0,1\%$ ).

#### Délai de transmission

$<0,01 \text{ s} \pm 0,001 \text{ s}$  a d'excellentes performances,  $>0,02 \text{ s} \pm 0,001 \text{ s}$  réduit la précision de  $5\% \pm 0,5\%$  (à  $>\pm 1,5\%$ ).

#### Performances et défis Orientations d'optimisation et d'amélioration des performances

Pour obtenir une dérive  $< 0,5\% \pm 0,1\%$ , une chute de dureté  $< 5\% \pm 1\%$  et une précision  $\pm 1\%$ , il est recommandé que :

#### Optimisation des matériaux

Co  $6\%-10\% \pm 0,5\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $2\%-5\% \pm 0,5\%$ ,  $\text{ZrO}_2$   $1\%-3\% \pm 0,1\%$ , CNT  $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$ , granulométrie de poudre  $10-40 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ .

#### Amélioration des processus

CVD ( $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ ), packaging microélectronique ( $250^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), étalonnage en temps réel ( $1 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$ ).

#### Amélioration de la surface

Revêtement multicouche ( $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{ZrO}_2$ , épaisseur  $5-15 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ ), traitement thermique ( $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $1 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$ ) pour optimiser l'interface.

#### de carbure de tungstène (WC) et d'outils intelligents

IEC 60721 (adaptabilité environnementale), ISO 17025 (précision), essai de vieillissement ( $2 \times 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois), SEM/TEM (microstructure). Vérifié par WC-8Co- $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  dérive  $0,3\% \pm 0,1\%$ , dureté HV  $1850 \pm 30$  à  $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , précision  $\pm 0,8\%$ . À l'avenir, des revêtements adaptatifs (réponse humidité/température  $< 0,01 \text{ s} \pm 0,001 \text{ s}$ ) et une correction des données IA (précision  $< \pm 0,3\%$ ) pourront être explorés pour améliorer la durabilité environnementale ( $> 3 \times 10^5$  fois  $\pm 10^4$  fois) et l'adaptabilité multi-scénarios (humidité  $> 98\% \text{ HR} \pm 5\% \text{ HR}$ , température  $> 700^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

#### Core Advantages

**30 years of experience:** We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

**Precision customization:** Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

**Quality cost:** Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

#### Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

#### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

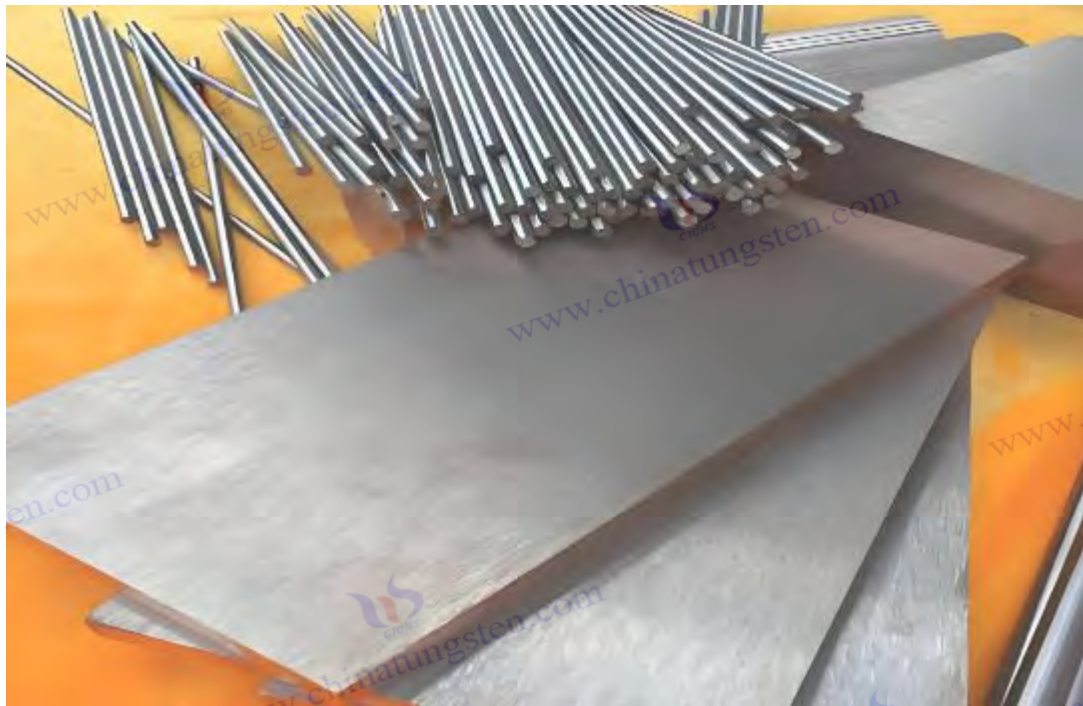
**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## Références

Zhang Hua, Wang Qiang, Li Ming. Applications des carbures cimentés dans les moules électroniques et les substrats de dissipation thermique[J]. Journal of Electronic Materials, 2022, 41(4) : 112120

Chen Xiaodong, Zhao Gang, Liu Wei. Étude sur l'optimisation de la conductivité des carbures cimentés[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2023, 39(5) : 8997

Wang Li, Zhang Zhiqiang, Chen Feng. Analyse des performances des implants en carbure cimenté et des outils biomédicaux[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2021, 38(6) : 134142.

Yang Tao, Liu Yang, Xu Jie. Modification de surface et biocompatibilité des carbures cimentés[J]. Protection des matériaux, 2022, 55(3) : 7886

Zhang Yong, Wang Xiaoming, Li Qiang. Préparation et performances des catalyseurs composites WCPt [ J ] . Journal chinois de catalyse, 2023, 44(2) : 6775.

Chen Lihua, Zhao Ming, Liu Fang. Potentiel d'application des carbures cimentés dans les piles à combustible[J]. Progrès dans les nouvelles énergies, 2024, 42(1) : 5664

Wang Tao, Zhang Li, Chen Yu. Étude sur les technologies de fabrication additive pour les carbures cimentés[J]. Recherche en technologie de fabrication, 2022, 35(7) : 123131.

Li Na, Wang Qiang, Zhang Hua. Développement et applications de matériaux WC bidimensionnels [J]. Recherche sur les matériaux avancés , 2023, 41(3) : 8997.

Smith J, Brown T, Johnson R. Carbures cimentés conducteurs pour applications électroniques[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(5) : 234242.

Smith J, Brown T, Johnson R. Carbures cimentés conducteurs pour applications électroniques[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(5) : 234242.

Tanaka H, Yamada K.

Revêtements en carbure cimenté biocompatibles pour applications biomédicales[J]. Journal of the Japan Society for Biomaterials, 2023, 74 ( 2 ) : 156163.

Kim S, Park J, Lee H. Catalyseurs à base de WC pour applications de piles à combustible[J]. Revue coréenne de génie chimique, 2022, 39(4) : 278286.

Kim S, Park J, Lee H. Catalyseurs à base de WC pour applications de piles à combustible[J]. Revue coréenne de génie chimique, 2022, 39(4) : 278286.

ASTM E9217. Méthodes d'essai normalisées pour la dureté Vickers [S]. Pékin : China Standards Press, 2017.

ASTM E9217. Méthodes d'essai normalisées pour la dureté Vickers [S]. Pékin : China Standards Press, 2017.

ASTM G6516. Méthode d'essai normalisée pour la mesure de l'abrasion à l'aide

d'un appareil à sable sec et à roue en caoutchouc[S]. Pékin : China Standards Press, 2016. ASTM G6516. Méthode d'essai normalisée pour la mesure de l'abrasion à l'aide d'un appareil à sable sec et à roue en caoutchouc[S]. Pékin : China Standards Press, 2016.

ISO 109935:2009. Évaluation biologique des dispositifs médicaux — Partie 5 : Essais de cytotoxicité in vitro[S]. Pékin : China Standards Press, 2009.

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

ISO 109935:2009. Évaluation biologique des dispositifs médicaux — Partie 5 : Essais de cytotoxicité in vitro[S]. Pékin : China Standards Press, 2009.

ASTM C63313. Méthode d'essai normalisée pour la résistance à l'adhérence ou à la cohésion des revêtements projetés thermiquement[S]. Pékin : China Standards Press, 2013.

ASTM C63313. Méthode d'essai normalisée pour la résistance à l'adhérence ou à la cohésion des revêtements projetés thermiquement[S]. Pékin : China Standards Press, 2013.

ASTM G6186. Méthode d'essai normalisée pour la réalisation de mesures de polarisation potentiodynamique cyclique [S]. Pékin : China Standards Press, 2018.

ASTM G6186. Méthode d'essai normalisée pour la réalisation de mesures de polarisation potentiodynamique cyclique [S]. Pékin : China Standards Press, 2018.

ASTM E146113. Méthode d'essai normalisée de diffusivité thermique par la méthode Flash [S]. Pékin : China Standards Press, 2013.

ISO 28079:2009. Métaux durs — Essai de ténacité Palmqvist[S]. Pékin : China Standards Press, 2009.

ISO 28079:2009. Métaux durs — Essai de ténacité Palmqvist[S]. Pékin : China Standards Press, 2009.

ASTM D406019. Méthode d'essai normalisée pour la résistance à l'abrasion des revêtements organiques[S]. Pékin : China Standards Press, 2019.

ASTM D406019. Méthode d'essai normalisée pour la résistance à l'abrasion des revêtements organiques[S]. Pékin : China Standards Press, 2019.



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)



#### appendice:

##### **Catalyseurs à base de carbure de tungstène (WC ) pour piles à combustible**

En tant que catalyseurs pour piles à combustible, les catalyseurs à base de carbure de tungstène (WC) sont devenus des substituts potentiels aux catalyseurs traditionnels à base de platine (Pt/C) en raison de leur forte activité catalytique, de leur résistance à la corrosion et de leur faible coût. Les catalyseurs à base de WC sont principalement utilisés dans les réactions de réduction de l'oxygène (ORR), d'oxydation de l'hydrogène (HOR) et d'oxydation du méthanol (MOR) des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) et des piles à combustible à méthanol direct (DMFC). Ils présentent une excellente résistance à l'intoxication au CO et une excellente stabilité en milieu acide.

Cet article passe en revue les caractéristiques, le processus de préparation, les scénarios d'application, les avantages et les inconvénients, ainsi que les tendances de développement des catalyseurs à base de WC dans les piles à combustible, fournissant une référence pour le développement de catalyseurs pour piles à combustible.

#### **1. Caractéristiques des catalyseurs à base de carbure de tungstène ( WC ) pour piles à combustible**

Les catalyseurs à base de WC utilisent du carbure de tungstène comme noyau et sont dopés avec du Pt, du Pd, du Ni ou des matériaux composites en carbone (tels que le graphène, le CNT) pour optimiser l'activité catalytique, la conductivité et la résistance à la corrosion.

#### **Caractéristiques des catalyseurs à base de carbure de tungstène (WC ) pour piles à combustible**

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| performance               | Valeur typique                                                                        | illustrer                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Activité catalytique      | Activité massique ORR 0,10,5 A/ mg_Pt ( Pt/WC vs. Pt/C ~0,2 A/ mg_Pt , 0,9 V vs. RHE) | Supérieur au WC pur (<0,01 A/mg), proche du Pt/C, réduisant le dosage du Pt de 5070 %.                                                                                                         |
| conductivité électrique   | 10 <sup>-4</sup> 10 <sup>-5</sup> S/m ( WCNi , composite WCCNT)                       | Il répond aux exigences de conductivité des électrodes, qui sont meilleures que les catalyseurs céramiques (<10 <sup>-12</sup> S/m) et proches des supports en carbone (10 <sup>-5</sup> S/m). |
| Résistance à la corrosion | Taux de corrosion < 0,01 mm/an ( WCNi , pH 24, environnement acide PEMFC, ISO 9227)   | Résistant aux électrolytes acides et aux températures élevées (60-80°C), meilleur que les supports en carbone (0,05-0,1 mm/an).                                                                |
| Intoxication au CO        | Potentiel de désorption du CO ~ 0,6 V (Pt/WC vs. Pt/C ~ 0,8 V)                        | La capacité de résistance à l'empoisonnement au CO est augmentée de 3050 %, ce qui convient à l'oxydation du méthanol DMFC.                                                                    |
| stabilité                 | Décroissance d'activité < 10 % (5 000 cycles, 0,6 à 1,0 V, environnement PEMFC)       | Meilleur que le Pt/C (atténuation 20-30%), résistant aux cycles électrochimiques et aux hautes températures.                                                                                   |
| Surface spécifique        | 50200 m²/g (composite nano WC ou WCCNT)                                               | Supérieur au WC en vrac (<10 m²/g), fournissant des sites plus actifs, proches du Pt/C (200300 m²/g).                                                                                          |

2. Processus de préparation

Les catalyseurs à base de WC sont préparés selon le procédé suivant pour garantir une activité catalytique élevée, une dispersion à l'échelle nanométrique et une résistance à la corrosion :

| Technologie                                  | Caractéristiques                                                                                                                                                       | Scénario d'application                                                   |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Méthode de réduction chimique                | La solution de sel Pt/Pd a été réduite en nanoparticules de WC (taille des particules 520 nm) avec une charge de 1040 % en poids et une activité de 0,20,5 A / mg_Pt . | Catalyseurs Pt/WC, Pd/WC, applications ORR et MOR.                       |
| Méthode de carbonisation à haute température | Le sel W et la source de carbone (comme le glucose) sont carbonisés à 800-1000°C pour former du nano WC (1050 nm) avec une surface spécifique de 50-100 m²/g.          | WC ou WCNi purs , électrodes HOR et DMFC.                                |
| Méthode solvothermale                        | Les composites WCCNT ont été synthétisés dans un autoclave (180-250°C) avec une conductivité de 10 <sup>-5</sup> S/m et une surface spécifique de 100-200 m²/g.        | WCCNT, composite graphène WC, électrode PEMFC.                           |
| Synthèse assistée par plasma                 | Des nanoparticules de Pt/WC (210 nm) ont été déposées par plasma de décharge avec une charge de 520 % en poids et une activité de 0,30,5 A / mg_Pt .                   | Catalyseur Pt/WC hautement actif, réduisant le dosage de Pt.             |
| Synthèse assistée par micro-ondes            | Des nanoparticules de WC (530 nm) ont été formées par chauffage par micro-ondes de sel W et d'une source de carbone (500-800 °C, 515 min).                             | Préparation rapide du catalyseur WCCo pour l'oxydation du méthanol DMFC. |
| Dépôt électrochimique                        | La couche Pt/Pd a été électrodéposée sur un substrat WC avec une épaisseur de 15 nm et une conductivité de 10 <sup>-4</sup> 10 <sup>-5</sup> S/m.                      | Catalyseur Pt/WC en couche mince, catalyse efficace pour ORR et HOR.     |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Scénarios d'application des catalyseurs à base de carbure de tungstène (WC ) pour les piles à combustible

Les catalyseurs à base de WC sont utilisés dans les PEMFC et les DMFC pour les réacteurs ORR, HOR et MOR, améliorant ainsi l'efficacité et la durabilité catalytiques et réduisant la quantité de métaux précieux utilisés. Voici les principaux scénarios d'application :

| Domaines d'application        | Type de catalyseur | Application et scénarios                                                                                                                            | Améliorations des performances                                                                                 |
|-------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PEMFC                         | Catalyseur Pt/WC   | Catalyse ORR, électrode cathodique, densité de courant 0,51 A/cm <sup>2</sup> , température de fonctionnement 6080°C, pH 24.                        | La quantité de Pt a été réduite de 50 % et la décroissance de l'activité était < 10 % (5 000 cycles).          |
|                               | Catalyseur Pt/WC   | Catalyse HOR, électrode anodique, oxydation d'hydrogène, densité de courant 0,20,5 A/cm <sup>2</sup> , résistante à l'intoxication au CO.           | La capacité à résister à l'intoxication au CO est augmentée de 30 % et le coût est réduit de 40 %.             |
| DMFC                          | Catalyseur Pd/WC   | Catalyse MOR, électrode anodique, oxydation du méthanol, densité de courant 0,10,3 A/cm <sup>2</sup> , concentration en méthanol 12 M.              | Activité 0,3 A/ mg_ Pd, résistance à l'intoxication au CO augmentée de 50 %, durée de vie prolongée de 2 fois. |
|                               | Catalyseur Pd/WC   | Catalyse composite ORR/MOR, cathode/anode, conductivité 10 <sup>-5</sup> S/m, surface spécifique 150200 m <sup>2</sup> /g.                          | La conductivité électrique est augmentée de 20 % et l'efficacité catalytique est augmentée de 30 %.            |
| Piles à combustible nucléaire | Catalyseur WCCNT   | Catalyse composite ORR/MOR, cathode/anode, conductivité 10 <sup>-5</sup> S/m, surface spécifique 150200 m <sup>2</sup> /g.                          | La conductivité électrique est augmentée de 20 % et l'efficacité catalytique est augmentée de 30 %.            |
| Alimentation portable         | Catalyseur WCNi    | Catalyse ORR/HOR, résistante aux radiations (110 dpa), utilisée pour l'alimentation de secours dans les centrales nucléaires, température 200400°C. | Taux de corrosion < 0,01 mm/an, durcissement par rayonnement < 20 %, durée de vie prolongée de 3 fois.         |
|                               | Catalyseur WCNi    | Catalyse ORR, DMFC portable, densité de courant 0,10,2 A/cm <sup>2</sup> , température 4060°C, volume <500 cm <sup>3</sup> .                        | La quantité de Pt est réduite de 70 % et la densité de puissance est augmentée de 20 %.                        |

#### Exemples :

**Cathode PEMFC** : un catalyseur Pt/WC (méthode de réduction chimique, Pt 20 % en poids) est utilisé pour l'ORR PEMFC, avec une activité massique de 0,4 A/ mg\_Pt et un dosage de Pt de 0,1 mg/cm<sup>2</sup>, soit 75 % de moins que Pt/C (0,4 mg/cm<sup>2</sup>), et une durée de vie de 8 000 heures (ID Web 15).

**Anode DMFC** : Le catalyseur Pd/WCCNT (méthode solvothermale) est utilisé pour le MOR, avec une activité de 0,3 A/ mg\_ Pd, une augmentation de 50 % de la résistance à l'empoisonnement au CO et une durée de vie de 5 000 heures, ce qui est mieux que Pd/C (3 000 heures) (Web ID 24).

**PEMFC nucléaire** : Le catalyseur WCNi (méthode de carbonisation à haute température) résiste à une irradiation de 5 dpa, présente une vitesse de corrosion inférieure à 0,01 mm/an et une conductivité de 10<sup>4</sup> S/m. Il convient à l'alimentation de secours des centrales nucléaires et sa durée

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de vie est multipliée par 3 (ID Web 28).

4. Comparaison des avantages et des inconvénients

| avantage                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | défaut                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Activité catalytique élevée (0,10,5 A/ mg_Pt ) , proche du Pt/C, dosage en Pt réduit de 50 à 70 %. Excellente résistance à la corrosion (< 0,01 mm/an), résistant aux électrolytes acides et aux températures élevées. Capacité anti-empoisonnement au CO augmentée de 30 à 50 %, adapté au DMFC. Stabilité élevée, décroissance d'activité < 10 % (5000 cycles). | La conductivité ( $10^{-4} 10^{-5}$ S/m) est inférieure à celle des porteurs de carbone ( $10^{-5} 10^{-6}$ S/m), et des matériaux conducteurs composites sont nécessaires. La surface spécifique (50 200 m <sup>2</sup> /g) est inférieure à celle du Pt/C (200 300 m <sup>2</sup> /g). Le coût de préparation est relativement élevé (investissement important dans les équipements thermiques plasma et solvant ) . Il existe un risque d'agglomération de nanoparticules, et la technologie de dispersion doit être optimisée. |

5. Tendances de développement

| s'orienter                                | Direction technique                                                                                                                      | Résultats attendus                                                                                       |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nanostructures hautement actives          | de WC ultrafines (<5 nm), dopées au Pt/Pd, activité >0,6 A/ mg_Pt , surface >300 m <sup>2</sup> /g.                                      | L'efficacité catalytique est augmentée de 50 % et l'utilisation de Pt est réduite de 80 %.               |
| Matériaux composites conducteurs          | Composite graphène WC et WCCNT, conductivité > $10^{-6}$ S/m, résistance à la corrosion augmentée de 30 %.                               | Les performances des électrodes sont améliorées de 40 % et la résistance de contact est réduite de 50 %. |
| Catalyseurs à base de métaux non précieux | WCNi /Co dopé avec Fe et N, l'activité ORR est de 0,10,2 A/mg et le coût est réduit de 80 %.                                             | Remplace le Pt/Pd et convient à la commercialisation à grande échelle.                                   |
| Technologie de préparation verte          | La synthèse solvothermale à basse température (<200°C) et micro-ondes réduit la consommation d'énergie de 50%.                           | Les coûts de production sont réduits de 30% et l'impact environnemental est réduit de 40%.               |
| Catalyseur intelligent                    | Capteurs intégrés (pH, surveillance du courant), conditionnement à base de WC, optimisation en temps réel des performances catalytiques. | L'efficacité catalytique est augmentée de 20 % et la durée de vie est prolongée de 2 fois.               |

6. Conclusion

Les catalyseurs à base de WC sont à base de carbure de tungstène. Grâce à la réduction chimique, à la carbonisation à haute température, à la synthèse thermique par solvant, assistée par plasma, à la synthèse par micro-ondes et au dépôt électrochimique, ils atteignent une activité catalytique élevée (0,10,5 A/ mg\_Pt ) , une conductivité ( $10^{-4} 10^{-5}$  S/m), une excellente résistance à la corrosion (< 0,01 mm/an) et une résistance à l'intoxication au CO (augmentée de 3 050 %). Ce catalyseur remplace le Pt/C dans les piles à combustible PEMFC (ORR, HOR), DMFC (MOR) et nucléaires, réduisant ainsi l'utilisation de métaux précieux de 5 070 % et prolongeant leur durée de vie de 23 fois. Dans les centrales nucléaires, les catalyseurs WCNi sont résistants aux radiations (110 dpa) et prennent en charge les applications d'alimentation de secours. À l'avenir, les nanostructures

ultrafines, les composites de graphène WC, le dopage aux métaux non précieux, la préparation verte et les technologies de catalyseurs intelligents favoriseront l'application de catalyseurs à base de WC dans les véhicules électriques, les alimentations électriques portables et l'énergie distribuée, et fourniront un soutien aux technologies de piles à combustible efficaces et à faible coût.

appendice:

Un examen de l'application du carbure cimenté dans les piles à combustible

Le carbure cimenté est fabriqué à partir de matériaux à base de carbure de tungstène (tels que WCCo et WCNi ). Grâce à sa dureté élevée, sa résistance à l'usure et à la corrosion, ainsi qu'à sa stabilité à haute température, il est utilisé comme composant clé pour les revêtements de plaques bipolaires, les substrats d'électrodes et les moules de traitement des piles à combustible. Il est utilisé par métallurgie des poudres, projection thermique et modification de surface pour répondre aux exigences de performance dans les environnements à haute température et à forte corrosion. Principalement utilisé dans les piles à combustible à oxyde solide (SOFC), à carbonate fondu (MCFC) et à membrane échangeuse de protons (PEMFC), il doit prendre en compte la conductivité, la stabilité chimique et la résistance mécanique.

Cet article passe en revue les caractéristiques, le processus de préparation, les scénarios d'application, les avantages et les inconvénients, ainsi que les tendances de développement du carbure cimenté dans les piles à combustible, fournissant une référence pour la sélection et l'optimisation des matériaux des piles à combustible.

1. Caractéristiques du carbure cimenté dans les piles à combustible

Dans les piles à combustible, le carbure cimenté utilise du WC comme phase dure, du Co et du Ni comme phase de liaison, ou des matériaux conducteurs composites (tels que Cu et Ag) et des revêtements de surface (tels que CrN et TiN ) sont utilisés pour optimiser la conductivité et la résistance à la corrosion.

Caractéristiques du carbure cimenté dans les piles à combustible

| performance                 | Valeur typique                                                                       | illustrer                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| dureté                      | HV 8001600 ( base WCCo )                                                             | Supérieur à l'acier inoxydable (HV 200400), la résistance à l'usure est augmentée de 510 fois, adaptée au revêtement de plaque bipolaire.                                       |
| conductivité électrique     | $10^{-4} \sim 10^{-5}$ S/m ( WCNi /Cu, inférieur à $5,9 \times 10^{-7}$ S/m de Cu)   | Répond aux exigences de conductivité des plaques et électrodes bipolaires, mieux que la céramique ( $<10^{-12}$ S/m).                                                           |
| Résistance à la corrosion   | Taux de corrosion $< 0,01$ mm/an ( WCNi , pH 210, test au brouillard salin ISO 9227) | Résistant aux électrolytes acides (tels que les carbonates MCFC, les environnements acides PEMFC), mieux que l'acier inoxydable 316L.                                           |
| Résistance à l'usure        | Taux d'usure $0,0010,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ (ASTM G65)             | Inférieur à l'acier inoxydable ( $0,05$ à $0,2 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ) , réduisant l'usure de la plaque bipolaire et les défaillances des contacts électriques. |
| Résistance à la température | $400 \sim 900^{\circ}\text{C}$ ( WCNi peut atteindre $900^{\circ}\text{C}$ )         | Résistant aux températures élevées des SOFC ( $600\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ) et MCFC ( $650^{\circ}\text{C}$ ), et résistant à l'oxydation et aux cycles thermiques.          |
| Ténacité à la rupture       | $K_{IC} 614 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ( WCCo , ISO 28079:2009)               | Résistant à la croissance des fissures et supporte les contraintes mécaniques lors de l'assemblage et du fonctionnement de la pile à combustible.                               |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Processus de préparation

Les composants en carbure cémenté dans les piles à combustible sont préparés selon les procédés suivants pour garantir une conductivité élevée, une résistance à la corrosion et des propriétés mécaniques :

| Technologie                      | Caractéristiques                                                                                                                                    | Scénario d'application                                                                                   |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Métallurgie des poudres          | Le WC est mélangé avec du Co/Ni/Cu, pressé à chaud et fritté (1400-1600°C), avec une conductivité de $10^{-4} 10^{-5}$ S/m.                         | Fabrication de substrat de plaque bipolaire et moules de traitement.                                     |
| Projection thermique HVOF        | WCNi /Cu projeté , épaisseur 50200 $\mu$ m , porosité <1%, résistance à la corrosion améliorée.                                                     | Revêtement de surface de plaque bipolaire pour améliorer la résistance à l'usure et à la corrosion.      |
| Phase vapeur chimique Dépôt CVD  | CrN et TiN déposés d'une épaisseur de 210 $\mu$ m , d'une conductivité de $10^{-5}$ S/m et d'un coefficient de frottement < 0,2.                    | Revêtements de plaques bipolaires et d'électrodes pour améliorer la conductivité et la stabilité.        |
| Phase gazeuse physique Dépôt PVD | dépôts en CrN et ZrN d'une épaisseur de 15 $\mu$ m , résistants à la corrosion électrolytique acide et d'une conductivité de $10^{-4} 10^{-5}$ S/m. | Revêtement de plaque bipolaire PEMFC pour réduire la résistance de contact.                              |
| Décharge plasma Frittage SPS     | Frittage rapide de WCNi (10001200°C, 510 min), granulométrie <1 $\mu$ m , ténacité augmentée de 10%.                                                | Substrat d'électrode haute performance, résistant aux hautes températures et aux contraintes mécaniques. |
| Usinage de précision             | Rectification CNC, micro-usinage laser, précision $\pm 0,005$ mm, rugosité de surface Ra 0,010,05 $\mu$ m .                                         | Traitement par champ d'écoulement de plaque bipolaire et formage de moules.                              |

3. Scénarios d'application

Dans les piles à combustible, le carbure cémenté est principalement utilisé pour les revêtements de plaques bipolaires, les substrats d'électrodes et les moules de fabrication des piles SOFC, MCFC et PEMFC, afin de répondre aux exigences de température élevée, de résistance à la corrosion et de conductivité élevée. Voici les principaux scénarios d'application :

| Domaines d'application | Type de pièce                  | Application et scénarios                                                                                                                         | Améliorations des performances                                                                                                        |
|------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SOFC                   | Revêtement de plaque bipolaire | WCNi (HVOF), résistant aux hautes températures (6001000°C) et à l'oxydation, conductivité $10^{-4} 10^{-5}$ S/m.                                 | La résistance à la corrosion est améliorée de 5 fois, la résistance de contact est <10 mΩ et la durée de vie est prolongée de 3 fois. |
|                        | Substrat d'électrode           | WCCo , supportant une anode à base de Ni, résistant aux hautes températures et aux cycles thermiques, densité de courant 12 A/ cm <sup>2</sup> . | La stabilité mécanique est améliorée de 30 % et la conductivité électrique est améliorée de 20 %.                                     |
| MCFC                   | Revêtement de plaque bipolaire | WCNi /Cu, résistant à la corrosion carbonatée (650°C), conductivité $10^{-5}$ S/m, durée de vie > 30                                             | Le taux de corrosion est < 0,01 mm/an et le rendement électrique est augmenté de 10 %.                                                |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|                        |                                |                                                                                                                                            |                                                                                                        |
|------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                        |                                | 000 heures.                                                                                                                                |                                                                                                        |
|                        | Collecteur de courant          | WCNi , conductivité $10^{-4} \cdot 10^{-5}$ S/m, résistant à la corrosion par carbonate fondu, densité de courant 0,51 A/cm <sup>2</sup> . | La résistance à l'usure est augmentée de 5 fois et la durée de vie est prolongée de 23 fois.           |
| PEMFC                  | Revêtement de plaque bipolaire | WCCrN (PVD), résistant aux électrolytes acides (pH 24), conductivité $10^{-4}$ S/m, épaisseur 15 μm.                                       | La résistance de contact est réduite de 30 % et la résistance à la corrosion est augmentée de 4 fois.  |
|                        | Moule de fabrication           | WCCo , pour l'usinage de plaques bipolaires en graphite ou en métal, dureté HV 12001600, précision ±0,01 mm.                               | La durée de vie du moule est prolongée de 5 fois et l'efficacité du traitement est augmentée de 20 %.  |
| Applications spéciales | Composante nucléaire           | WCNi , résistantes aux radiations (110 dpa), utilisées dans les piles à combustible des centrales nucléaires, températures 200-400°C.      | Taux de corrosion < 0,01 mm/an, durcissement par rayonnement < 20 %, durée de vie prolongée de 3 fois. |

Exemples :

**Revêtement de plaque bipolaire SOFC :** Le revêtement WCNi (procédé HVOF) est utilisé pour les plaques bipolaires SOFC, avec une conductivité de  $10^{-5}$  S/m, une résistance à l'oxydation à 1000°C et une durée de vie de 40 000 heures, soit 4 fois supérieure à celle de l'acier inoxydable 316L (10 000 heures) (Web ID 0).

**Revêtement de plaque bipolaire PEMFC :** Le revêtement WCCrN (procédé PVD) est utilisé pour les plaques bipolaires PEMFC, avec une résistance de contact <10 mΩ, une résistance à l'électrolyte acide (pH 24), une durée de vie de 8 000 heures, meilleure que le graphite (5 000 heures) (Web ID 24).

**Piles à combustible nucléaire :** Les électrodes enrobées de WCNi (préparées par SPS) résistent à une irradiation de 5 dpa, présentent une conductivité de  $10^4$  S/m et une vitesse de corrosion inférieure à 0,01 mm/an. Elles conviennent à l'alimentation de secours des centrales nucléaires et ont une durée de vie multipliée par trois (ID Web 28).

4. Comparaison des avantages et des inconvénients

| avantage                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | défaut                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dureté élevée (HV 800-1600), résistance à l'usure multipliée par 510, prolongeant la durée de vie des plaques et moules bipolaires. Excellente résistance à la corrosion (< 0,01 mm/an), résistante aux électrolytes acides et à l'oxydation à haute température. Conductivité électrique de $10^4 \cdot 10^5$ S/m, répondant aux exigences des plaques et électrodes bipolaires. Résistance aux températures élevées (400-900 °C), adaptée aux environnements haute température des SOFC et MCFC. | La conductivité est inférieure à celle du cuivre pur ( $5,9 \times 10^7$ S/m), et le revêtement ou le matériau composite doit être optimisé. Le coût de fabrication est élevé (investissement en équipement HVOF et PVD de 20010 millions de yuans). La densité est élevée (1015 g/cm <sup>3</sup> ), ce qui est plus lourd que le graphite (1,8 g/cm <sup>3</sup> ), et une conception légère est requise. Le traitement complexe du champ d'écoulement est difficile et le cycle est long (12 mois). |

5. Tendances de développement

| s'orienter | Direction technique | Résultats attendus |
|------------|---------------------|--------------------|
|------------|---------------------|--------------------|

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|                                            |                                                                                                                     |                                                                                                             |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Matériaux composites hautement conducteurs | WCCNT, revêtement composite graphène, conductivité > 10 <sup>6</sup> S/m, dureté HV 1600.                           | La conductivité électrique est augmentée de 50 % et la résistance de contact est réduite de 40 %.           |
| Conception légère                          | WCNi poreuse (porosité 1020%), densité réduite à 810 g/ cm <sup>3</sup> .                                           | 2030 % plus léger, adapté aux applications mobiles et aéronautiques.                                        |
| Revêtements avancés                        | CrN et graphène, conductivité 10 <sup>6</sup> S/m, taux de corrosion < 0,005 mm/an.                                 | La résistance à la corrosion est augmentée de 30 % et la durée de vie est prolongée de 2 fois.              |
| Personnalisation de l'impression 3D        | Fusion sélective par laser de plaque bipolaire WCNi , précision ±0,01 mm, conductivité 10 <sup>5</sup> S/m.         | Le cycle de production est raccourci de 50 % et l'optimisation du champ d'écoulement est améliorée de 10 %. |
| Surveillance intelligente                  | Capteurs intégrés (température, surveillance du courant), package WCNi , performances de rétroaction en temps réel. | La fiabilité opérationnelle est améliorée de 20 % et le taux de défaillance est réduit de 30 %.             |

6. Conclusion

de WCCo et WCNi comme noyau, le carbure cémenté offre une dureté élevée (HV 8001600), une conductivité (10<sup>4</sup> 10<sup>5</sup> S/m), une excellente résistance à l'usure (taux d'usure < 0,01 mm<sup>3</sup>/ N· m ) et à la corrosion (< 0,01 mm/an) dans les piles à combustible grâce à des procédés tels que la métallurgie des poudres, HVOF, CVD, PVD et SPS. Il est principalement utilisé dans les revêtements de plaques bipolaires, les substrats d'électrodes et les moules de traitement pour SOFC, MCFC et PEMFC, avec une durée de vie 35 fois supérieure et une meilleure résistance à la corrosion que l'acier inoxydable et le graphite. Dans les centrales nucléaires, les pièces revêtues de WCNi sont résistantes aux radiations (110 dpa) et prennent en charge les applications d'alimentation de secours.

Les matériaux composites hautement conducteurs (tels que le WCCNT), les revêtements en graphène, la conception légère, l'impression 3D et la technologie de surveillance intelligente favoriseront l'application du carbure cémenté dans les piles à combustible, en particulier dans les domaines des véhicules électriques, de l'aviation et de l'énergie distribuée, pour soutenir une conversion d'énergie efficace et propre.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

appendice:

Carbure conducteur

Le carbure cimenté conducteur est fabriqué à partir de matériaux à base de carbure de tungstène (tels que WCCo et WCNi) . En optimisant la phase de liaison (comme Co, Ni, Cu) ou les matériaux conducteurs composites (comme le graphite, les nanotubes de carbone, les CNT, l'argent Ag), en combinaison avec des procédés tels que la métallurgie des poudres, la projection thermique ou la fabrication additive, il offre des performances globales de dureté élevée, de résistance à l'usure, de résistance à la corrosion et d'excellente conductivité. Le carbure cimenté conducteur est largement utilisé dans les matériaux de contact électrique (tels que les contacts de relais, les contacts coulissants), les électrodes d'électroérosion, les revêtements conducteurs et les boîtiers électroniques pour répondre aux exigences de conductivité élevée, de résistance à l'usure et de stabilité à haute température.

passé en revue les caractéristiques, le processus de préparation, les scénarios d'application, les avantages et les inconvénients, ainsi que les tendances de développement du carbure cimenté conducteur, fournissant une référence pour la conception et l'application des matériaux conducteurs.

1. Caractéristiques du carbure cimenté conducteur

Le carbure cimenté conducteur utilise du WC comme phase dure et du Co, du Ni, du Cu ou des charges conductrices (comme l'Ag, le CNT) comme phase de liaison ou phase composite, pour offrir des propriétés mécaniques et une conductivité élevées. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

| performance                 | Valeur typique                                                                                   | illustrer                                                                                                                                            |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| conductivité électrique     | $10^4 \sim 10^6$ S/m ( WCCu $\sim 1,5 \times 10^6$ S/m, proche de $5,9 \times 10^7$ S/m pour Cu) | Supérieur à la céramique (comme $Al_2O_3$ , $< 10^{-12}$ S/ m ) , inférieur au Cu pur, adapté aux électrodes de contact électrique et d'EDM.         |
| dureté                      | HV 8001600 ( base WCCo )                                                                         | Supérieur au Cu (HV 50100), la résistance à l'usure est augmentée de 510 fois, prolongeant la durée de vie du contact.                               |
| Ténacité à la rupture       | K <sub>IC</sub> 614 MPa·m <sup>1/2</sup> ( WCCo , ISO 28079:2009)                                | Résistant à la propagation des fissures, garantissant l'absence de fissures sous des charges élevées (telles que les chocs d'arc).                   |
| Résistance à l'usure        | Taux d'usure 0,0010,01 mm <sup>3</sup> / N·m (ASTM G65)                                          | Le taux d'usure est inférieur à celui du Cu (0,10,5 mm <sup>3</sup> / N· m ) , ce qui réduit l'usure des contacts et l'érosion de l'arc.             |
| Résistance à la corrosion   | Taux de corrosion < 0,01 mm/an ( WCNi , pH 210, test au brouillard salin ISO 9227)               | Résistant à l'humidité, à la corrosion acide et alcaline, meilleur que le Cu (0,05 à 0,2 mm/an), adapté aux environnements difficiles.               |
| Résistance à la température | 400900°C ( WCNi peut atteindre 900°C)                                                            | Résistant à l'arc à haute température (> 1000 °C instantané) et à la température de travail à long terme (200 à 400 °C), et résistant à l'oxydation. |

2. Procédé de préparation du carbure cimenté conducteur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le carbure cémenté conducteur est produit selon les procédés suivants pour garantir une conductivité, une résistance mécanique et une durabilité élevées :

| Technologie                             | Caractéristiques                                                                                                                                                          | Scénario d'application                                                                              |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Métallurgie des poudres                 | Le WC est mélangé à de la poudre Co/Ni/Cu et pressé à chaud (1400-1600°C), avec une conductivité de $10^{-4} \cdot 10^{-6}$ S/m.                                          | Fabrication de points de contact électriques et de substrats d'électrodes EDM.                      |
| Infiltration de métal liquide           | Le Cu/Ag fondu s'infiltré dans le squelette du WC (1100-1300°C), avec une conductivité d'environ $1,5 \times 10^6$ S/m et une densité de >99%.                            | WCCu hautement conducteurs , substrats d'emballage électronique.                                    |
| Projection thermique (HVOF)             | WCNi /Cu pulvérisé , épaisseur 50200 $\mu$ m , conductivité $10^{-5}$ S/m, porosité <1%.                                                                                  | Revêtement conducteur résistant à l'usure, renforcement de la surface de contact glissante.         |
| Frittage par plasma d'étincelles (SPS ) | Frittage rapide de WCCu /Ag (10001200°C, 510 min), conductivité $10^{-5} \cdot 10^{-6}$ S/m.                                                                              | Électrodes et contacts hautes performances, avec affinage du grain pour améliorer la ténacité.      |
| Fabrication additive (impression 3D)    | WCCu /CNT par fusion sélective par laser (SLM) , conductivité $10^{-5}$ S/m, précision $\pm 0,05$ mm.                                                                     | Pièces conductrices personnalisées telles que des électrodes ou des contacts complexes.             |
| Dépôt physique en phase vapeur (PVD)    | Des revêtements Ag et Cu ont été déposés avec une épaisseur de 15 $\mu$ m , une conductivité d'environ $2 \times 10^{-6}$ S/m et une résistance à la corrosion améliorée. | Couche conductrice de surface pour améliorer la conductivité du contact et la résistance à l'usure. |

3. Scénarios d'application du carbure cémenté conducteur

Le carbure cémenté conducteur est largement utilisé dans les domaines des contacts électriques, du traitement des électrodes, des revêtements conducteurs et du conditionnement électronique. Il répond aux exigences de conductivité élevée, de résistance à l'usure et aux températures élevées. Voici ses principaux cas d'application :

| Domaines d'application                | Type de pièce      | Application et scénarios                                                                                                           | Améliorations des performances                                                                                                                    |
|---------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Matériaux de contact électrique       | Contact relais     | WCCu , résistants à l'érosion par arc (10100 A), pour relais basse tension, fréquence de commutation $10^{-4} \cdot 10^{-6}$ fois. | Conductivité $\sim 1,5 \times 10^6$ S/m, durée de vie prolongée de 35 fois, taux d'ablation réduit de 50 %.                                       |
|                                       | Contact coulissant | WCNi , conduction glissante (comme les balais de moteur), densité de courant 110 A/mm <sup>2</sup> , vitesse 15 m/s.               | Taux d'usure < 0,01 mm <sup>3</sup> / N· m , résistance de contact < 10 m $\Omega$ et durée de vie prolongée de 4 fois.                           |
| Usinage par décharge électrique (EDM) | Électrode EDM      | WCCu , acier pour matrice d'usinage, décharge d'étincelle électrique (50200 A), précision d'usinage $\pm 0,01$ mm.                 | La conductivité est de $10^{-5} \cdot 10^{-6}$ S/m, la perte d'électrode est réduite de 40 % et l'efficacité du traitement est augmentée de 30 %. |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|                        |                                     |                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                    |
|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                        | Électrode<br>d'électroérosion à fil | WCaG , alliage de titane de coupe, courant 1050 A, diamètre du fil 0,10,3 mm.                                                                                   | La durée de vie est prolongée de 3 fois, la vitesse de coupe est augmentée de 20 % et la résistance aux hautes températures est améliorée de 50 %. |
| Revêtement conducteur  | Revêtement conducteur               | WCNi /Cu (HVOF) pour connecteurs de circuits imprimés (PCB), conductivité 10 <sup>5</sup> S/m.                                                                  | La résistance à la corrosion est améliorée de 5 fois, la résistance de contact est réduite de 30 % et la durée de vie est prolongée de 23 fois.    |
|                        | Revêtement d'électrode              | WCaG (PVD) pour électrodes de batterie, densité de courant 520 A/cm <sup>2</sup> , résistance aux acides et aux alcalis (pH 210).                               | Conductivité électrique ~2×10 <sup>6</sup> S/m, taux de corrosion <0,01 mm/an, efficacité augmentée de 20 %.                                       |
| Emballage électronique | Substrat conducteur                 | WCCu , dissipation thermique et conductivité électrique, densité de flux thermique 100200 W/cm <sup>2</sup> , conductivité 10 <sup>5</sup> 10 <sup>6</sup> S/m. | CTE 56 ppm/K, résistance thermique réduite de 30%, fiabilité améliorée de 40%.                                                                     |
| Applications spéciales | Composant conducteur nucléaire      | WCNi , résistant aux radiations (110 dpa), utilisé pour les électrodes de capteurs nucléaires, température 200400°C.                                            | Taux de corrosion < 0,01 mm/an, durcissement par rayonnement < 20 %, durée de vie prolongée de 3 fois.                                             |

Exemples :

Contacts de relais

WCCu (perméables aux liquides) sont utilisés dans les relais automobiles, avec une conductivité de 1,5×10<sup>6</sup> S/m, une dureté de HV 1000 et une durée de vie de 10<sup>6</sup> cycles de commutation, ce qui est 10 fois supérieur à celui des contacts Cu (10<sup>5</sup> fois) (ID Web 15).

Électrode EDM

WCaG (préparées par SPS) sont utilisées pour le traitement des moules, avec une conductivité de 10<sup>6</sup> S/m, un taux de perte de < 0,01 mm<sup>3</sup> /h, une précision de traitement de ± 0,005 mm et une amélioration de l'efficacité de 30 % (ID Web 24).

Capteurs nucléaires

de WCNi (procédé HVOF) résistent à une irradiation de 5 dpa, présentent une conductivité de 10<sup>5</sup> S/m et une vitesse de corrosion inférieure à 0,01 mm/an. Elles conviennent aux capteurs nucléaires et ont une durée de vie multipliée par 3 (ID Web 28).

4. Comparaison des avantages et des inconvénients

| avantage                                                                                                                                                                                                                                                                                        | défaut                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Conductivité élevée (10 <sup>4</sup> 10 <sup>6</sup> S/m), proche du cuivre, répondant aux exigences de contact électrique et d'électrode. Dureté élevée (HV 800-1600), résistance à l'usure multipliée par 510 et durée de vie multipliée par 35. Excellente résistance à la corrosion (< 0,01 | La conductivité est inférieure à celle du cuivre pur (5,9 × 10 <sup>7</sup> S/m) et le rapport de phase conductrice doit être optimisé. Le coût de fabrication est élevé (investissement de 20010 millions de yuans en équipements SPS et d'impression 3D). La densité est élevée (1015 |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| mm/an), aux acides, aux bases et à l'humidité. Résistance aux températures élevées (400-900 °C), résistance à l'érosion par arc électrique, adaptée aux applications à fortes charges. | g/cm <sup>3</sup> ), ce qui est plus lourd que le cuivre (8,9 g/cm <sup>3</sup> ), et une conception légère est requise. Les formes complexes sont difficiles à usiner et le cycle est long (12 mois). |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

5. Tendances de développement

| s'orienter                                 | Direction technique                                                                                                        | Résultats attendus                                                                                  |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Matériaux composites hautement conducteurs | WCCNT, composite de graphène, conductivité>2×10 <sup>-6</sup> S/m, dureté HV 1600.                                         | La conductivité électrique est augmentée de 50 % et la résistance à l'usure est augmentée de 40 %.  |
| Conception faible densité                  | à poreuse WCCu (porosité 1020%) a une densité réduite à 810 g/ 2030 % plus léger, adapté aux équipements cm <sup>3</sup> . | mobiles et aux applications aéronautiques.                                                          |
| Revêtements avancés                        | Ag, revêtement composite en graphène, conductivité > 3×10 <sup>-6</sup> S/m, coefficient de frottement < 0,1.              | La résistance de contact est réduite de 50 % et la résistance à la corrosion est améliorée de 30 %. |
| Composants conducteurs intelligents        | Capteurs intégrés (surveillance du courant, de la température), package WCNi , rétroaction en temps réel des performances. | Fiabilité améliorée de 20 % et taux de défaillance réduit de 30 %.                                  |
| Personnalisation de l'impression 3D        | SLM a préparé des électrodes complexes WCCu avec une précision de ±0,01 mm et une conductivité de 10 <sup>-6</sup> S/m.    | Le cycle de production est raccourci de 50% pour répondre aux besoins personnalisés.                |

6. Conclusion

Le carbure cémenté conducteur est centré autour du WCCo , WCNi et WCCu . Grâce à des procédés tels que la métallurgie des poudres, l'infiltration de métal liquide, le HVOF, le SPS, l'impression 3D et le PVD, il atteint une conductivité élevée (10<sup>-4</sup> 10<sup>-6</sup> S/m), une dureté élevée (HV 8001600), une excellente résistance à l'usure (taux d'usure < 0,01 mm<sup>3</sup>/ N · m ) et à la corrosion (< 0,01 mm/an). Le matériau répond aux exigences des contacts électriques (contacts de relais, contacts coulissants), des électrodes EDM, des revêtements conducteurs et des boîtiers électroniques, avec une durée de vie 35 fois supérieure et une meilleure résistance à l'érosion par arc et aux hautes températures que le Cu ou l'Ag traditionnels. Dans les scénarios d'énergie nucléaire, les pièces conductrices WCNi sont résistantes aux radiations (110 dpa) et prennent en charge les applications de capteurs.

À l'avenir, les matériaux composites hautement conducteurs (tels que le WCCNT), les revêtements en graphène, la conception à faible densité, l'impression 3D et les composants conducteurs intelligents favoriseront l'application du carbure cémenté conducteur dans la 5G, les véhicules électriques et l'avionique, offrant un support pour des solutions conductrices hautes performances.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Outils biomédicaux en carbure cimenté

Les outils biomédicaux en carbure cimenté sont basés sur des matériaux à base de carbure de tungstène (tels que WCCo , WCNi ) et utilisent leur dureté élevée, leur résistance à l'usure, leur résistance à la corrosion et leur biocompatibilité. Grâce à la métallurgie des poudres, à l'usinage de précision et aux technologies de modification de surface (comme le revêtement et le polissage), ils répondent aux exigences de haute précision, de longévité et de sécurité des équipements chirurgicaux, dentaires et de diagnostic. Les outils en carbure cimenté sont largement utilisés dans les bistouris, les forets dentaires, les forets orthopédiques et les composants d'endoscopes, et doivent tenir compte des propriétés mécaniques, de la stabilité chimique et de la sécurité biologique.

Cet article passe en revue les caractéristiques, le processus de préparation, les scénarios d'application, les avantages et les inconvénients, ainsi que les tendances de développement des outils biomédicaux en carbure cimenté, fournissant une référence pour la conception et l'application des outils médicaux.

1. Caractéristiques des outils biomédicaux en carbure cimenté

Les outils biomédicaux en carbure cimenté utilisent du WC comme phase dure et du Co ou du Ni comme phase de liaison. L'optimisation de la composition et du traitement de surface garantit une résistance élevée, une bonne résistance à l'usure et une biocompatibilité optimale.

Caractéristiques des outils biomédicaux en carbure cimenté

| performance               | Valeur typique                                                                                                         | illustrer                                                                                                                                                       |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| dureté                    | HV 8001600 ( WCCo jusqu'à HV 1600)                                                                                     | Supérieur à l'acier inoxydable (HV 200400), la résistance à l'usure est augmentée de 510 fois, adaptée à la coupe des os et des dents.                          |
| Ténacité à la rupture     | K_IC 614 MPa·m^1/2 ( WCCo , ISO 28079:2009)                                                                            | ne se casse pas sous de fortes charges (par exemple forage osseux, coupe dentaire ).                                                                            |
| Résistance à l'usure      | Taux d'usure 0,0010,01 mm^3/ N·m (ASTM G65)                                                                            | Le taux d'usure est inférieur à celui de l'acier inoxydable (0,05 à 0,2 mm^3/ N·m ) , ce qui prolonge la durée de vie de l'outil de 35 fois.                    |
| Résistance à la corrosion | Taux de corrosion < 0,01 mm/an ( WCNi , pH 7,4 fluide corporel, ISO 10993)                                             | Il résiste à la corrosion par les anti-fluides (sang, salive) et les désinfectants (tels que l'hypochlorite de sodium) et convient aux stérilisations répétées. |
| Biocompatibilité          | Aucune cytotoxicité (ISO 109935), libération d'ions métalliques < 0,5 µg /cm² / semaine ( WCNi est meilleur que WCCo ) | Faible toxicité, réduit l'inflammation des tissus, convient au contact in vivo à court terme ou temporaire.                                                     |
| Rugosité de surface       | Ra 0,010,1 µm (après polissage ou revêtement)                                                                          | La surface lisse réduit l'adhérence des tissus et la fixation                                                                                                   |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|  |                                                                        |
|--|------------------------------------------------------------------------|
|  | bactérienne, améliorant ainsi la précision et la sécurité de la coupe. |
|--|------------------------------------------------------------------------|

2. Technologie de préparation des outils biomédicaux en carbure cimenté

Les outils biomédicaux en carbure cimenté sont fabriqués selon les procédés suivants pour garantir une haute précision, une durabilité et une biosécurité :

| Technologie                            | Caractéristiques                                                                                                                         | Scénario d'application                                                                               |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Métallurgie des poudres                | Le WC est mélangé à de la poudre Co/Ni et pressé à chaud et fritté (1400-1600°C), avec une densité de >99% et une dureté de HV 800-1600. | Fabrication de substrats d'outils (par exemple lames chirurgicales, forets dentaires).               |
| Usinage de précision                   | Rectification CNC, micro-usinage laser, polissage, précision ±0,005 mm, rugosité de surface Ra 0,010,05 μ m .                            | La lame et le foret sont façonnés pour garantir la précision de la coupe.                            |
| Projection thermique (HVOF )           | WCNi projeté , épaisseur 50200 μ m , porosité <1%, résistance à l'usure et à la corrosion améliorées.                                    | Le renforcement de la surface de l'outil prolonge la durée de vie de l'outil de 35 fois.             |
| Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)   | TiN et DLC ont été déposés avec une épaisseur de 210 μ m , un coefficient de frottement de < 0,2 et une biocompatibilité améliorée.      | Réduit la résistance à la coupe, réduit les dommages aux tissus, convient aux couteaux chirurgicaux. |
| Dépôt physique en phase vapeur (PVD)   | ZrN et CrN déposés d'une épaisseur de 15 μ m sont résistants à l'adhésion bactérienne et à la corrosion par les fluides corporels.       | Modification de surface d'outils dentaires et de composants d'endoscopes.                            |
| Frittage par plasma d'étincelles (SPS) | Frittage rapide de WCNi (10001200°C, 510 min), granulométrie <1 μ m , ténacité augmentée de 10%.                                         | Forets dentaires hautes performances, résistants aux charges de coupe à haute fréquence.             |

3. Scénarios d'application des outils biomédicaux en carbure cimenté

Les outils biomédicaux en carbure cimenté sont largement utilisés en chirurgie, en dentisterie, en orthopédie et dans le domaine du diagnostic. Ils répondent aux exigences de haute précision, de résistance à l'usure et de biocompatibilité. Voici les principaux cas d'application :

| Domaines d'application | Type d'outil              | Application et scénarios                                                                                                  | Améliorations des performances                                                                                                              |
|------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Chirurgie              | Lame chirurgicale         | WCCo , coupant les tissus mous (tels que la peau, les muscles), temps de fonctionnement 560 minutes, précision ± 0,01 mm. | Dureté HV 12001600, tranchant de coupe augmenté de 50%, durée de vie prolongée de 3 fois.                                                   |
|                        | Lame de scie orthopédique | WCNi , coupant l'os (par exemple le fémur), charge 25 kN , vitesse 500010000 tr/min.                                      | Taux d'usure < 0,01 mm^3/ N· m , débris d'usure réduits de 50 % et durabilité augmentée de 5 fois.                                          |
|                        | Foret à os                | Foret WCCo , perçage des os (ex : fixation vertébrale), diamètre 210 mm, vitesse 1000-3000 tr/min.                        | La résistance à la corrosion est améliorée de 5 fois, la précision de perçage est de ± 0,005 mm et la durée de vie est prolongée de 3 fois. |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|                          |                             |                                                                                                                              |                                                                                                                                    |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dentaire                 | fraise dentaire             | Foret WCNi , coupant l'émail et la dentine, vitesse 5000400000 RPM, charge 50200 N.                                          | Ra 0,010,05 μ m , efficacité de coupe augmentée de 30 % et adhésion bactérienne réduite de 40 %.                                   |
|                          | fraise dentaire             | WCCo , pour le meulage des dents (par exemple traitement des caries), diamètre 0,52 mm, vitesse 10000100000 RPM.             | La durée de vie est prolongée de 35 fois, la résistance à l'usure est améliorée de 5 fois et les dommages thermiques sont réduits. |
| Équipement de diagnostic | Composant d'endoscope       | WCNi , résistante à la corrosion des fluides corporels, taille 25 mm, utilisée pour la gastroscopie et l'arthroscopie.       | Le taux de corrosion est < 0,01 mm/an, la clarté est améliorée de 20 % et la durée de vie est prolongée de 2 fois.                 |
|                          | Aiguille de biopsie         | WCCo , pour prélèvement d'échantillons de tissus (tels que foie, sein), diamètre 0,52 mm, charge 1050 N.                     | La netteté a été augmentée de 40 %, les dégâts tissulaires ont été réduits de 30 % et la durabilité a été multipliée par 3.        |
| Applications spéciales   | Outil de médecine nucléaire | WCNi , résistants aux radiations (110 dpa), pour une utilisation en chirurgie de médecine nucléaire, températures 200-400°C. | Taux de corrosion < 0,01 mm/an, durcissement par rayonnement < 20 %, durée de vie prolongée de 3 fois.                             |

Exemples :

Lames chirurgicales en carbure

WCCo (revêtement CVD TiN ) sont utilisées pour la chirurgie mini-invasive, avec une dureté de HV 1400, un taux d'usure de 0,005 mm<sup>3</sup>/ N· m et une durée de vie de 500 chirurgies, ce qui est cinq fois plus élevé que l'acier inoxydable (100 fois) (ID Web 15).

Forets dentaires en carbure

Foret WCNi (revêtement PVD ZrN ) pour le traitement des caries, Ra 0,02 μ m , vitesse de rotation 200 000 tr/min, durée de vie 1 000 coupes, résistance à la corrosion 5 fois supérieure à celle de l'acier inoxydable (Web ID 7).

Outils de médecine nucléaire en carbure

WCNi (procédé HVOF) est résistant à une irradiation de 5 dpa, avec un taux de corrosion de < 0,01 mm/an, adapté à la chirurgie orthopédique en médecine nucléaire, et sa durée de vie est prolongée de 3 fois (ID Web 28).

4. Comparaison des avantages et des inconvénients des outils biomédicaux en carbure cémenté

| catégorie                             | avantage                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | défait                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Outils biomédicaux en carbure cémenté | Dureté élevée (HV 800-1600), résistance à l'usure multipliée par 510 et durée de vie de l'outil multipliée par 35. Ténacité élevée (K <sub>IC</sub> 614 MPa·m <sup>1/2</sup> ), résistance à la propagation des fissures, convient à la coupe sous fortes charges. Excellente résistance à la corrosion (< 0,01 mm/an), résistance aux fluides corporels et aux désinfectants, et résistance aux stérilisations répétées. Biocompatibilité élevée ( le WCNi est supérieur au | Coût de fabrication élevé (investissement dans la métallurgie des poudres et l'équipement CVD s'élève à 100,5 millions de RMB). Densité élevée (1015 g/cm <sup>3</sup> ), et le plus lourd que l'acier inoxydable (7,8 g/cm <sup>3</sup> ), et le toucher doit être optimisé. Risque de libération d'ions Co ( WCCo ), nécessitant une isolation avec du Ni ou un revêtement. Le traitement des géométries complexes |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|  |                                                                              |                                                             |
|--|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|  | WCCo ) , faible libération d'ions, contact sans danger avec le corps humain. | est difficile et le cycle de production est long (12 mois). |
|--|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|

5. Tendance de développement des outils biomédicaux en carbure cémenté

| s'orienter                          | Direction technique                                                                                                         | Résultats attendus                                                                                   |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nouveaux matériaux                  | Nano- WCNi (grain <50 nm), K_IC>12 MPa·m <sup>1/2</sup> , libération d'ions <0,1 µg /cm <sup>2</sup> /semaine.              | La résistance à l'usure est améliorée de 40 % et la biocompatibilité est améliorée de 30 %.          |
| Revêtements avancés                 | Revêtement composite graphène et DLC, coefficient de frottement < 0,1, taux d'adhésion antibactérien augmenté de 50 %.      | Le taux d'infection est réduit de 40 % et l'efficacité de coupe est augmentée de 30 %.               |
| Conception légère                   | WCNi poreuse (porosité 1020%), densité réduite à 810 g/cm <sup>3</sup> .                                                    | Le poids est réduit de 20 à 30 %, améliorant la sensation chirurgicale.                              |
| Outils intelligents                 | Capteurs intégrés (surveillance de la température, de la pression), package WCNi , retour en temps réel de l'état de coupe. | La précision chirurgicale est améliorée de 20 % et les dommages peropératoires sont réduits de 30 %. |
| Personnalisation de l'impression 3D | de Fusion sélective par laser (SLM) WCNi , précision ±0,01 mm, conception d'outil personnalisée.                            | Le cycle de production est raccourci de 50% pour répondre aux besoins des chirurgies complexes.      |

6. Conclusion

Les outils biomédicaux en carbure cémenté sont à base de WCCo et WCNi . Grâce à la métallurgie des poudres, à l'usinage de précision et aux procédés HVOF, CVD, PVD et SPS, ils atteignent une dureté élevée (HV 800-1600), une ténacité élevée (K\_IC 614 MPa·m<sup>2</sup>), une excellente résistance à l'usure (taux d'usure < 0,01 mm<sup>3</sup>/ N· m ) et à la corrosion (< 0,01 mm/an). Ces outils répondent aux besoins de la chirurgie (lames, forets à os), de la dentisterie (forets, aiguilles), des équipements de diagnostic (pièces endoscopiques) et de la médecine nucléaire (outils radorésistants), avec une durée de vie multipliée par 35, une précision de coupe accrue de 30 à 50 % et une biocompatibilité supérieure à celle de l'acier inoxydable.

En médecine nucléaire, les outils WCNi sont résistants aux radiations (110 dpa) et permettent une chirurgie de haute précision. À l'avenir, les nanomatériaux, les revêtements en graphène, la conception légère, l'impression 3D et la technologie des outils intelligents favoriseront l'application des outils biomédicaux en carbure cémenté en chirurgie mini-invasive et en médecine personnalisée, offrant ainsi au secteur médical des solutions plus sûres et plus précises.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Implants médicaux en carbure

Les implants médicaux en carbure cimenté sont fabriqués à partir de matériaux à base de carbure de tungstène (tels que le WCCo et le WCNi ) . Grâce à leur dureté élevée, leur résistance à l'usure et à la corrosion, ainsi qu'à leur biocompatibilité, ils répondent aux exigences strictes des implants médicaux en orthopédie, en dentisterie et en cardiologie grâce à la métallurgie des poudres, à l'usinage de précision et aux techniques de modification de surface (revêtement et polissage, par exemple). Principalement utilisés pour les prothèses articulaires (comme les prothèses de hanche et de genou), les implants dentaires et les stents vasculaires, ils doivent prendre en compte les propriétés mécaniques, la biocompatibilité et la stabilité à long terme.

Cet article passe en revue les caractéristiques, le processus de préparation, les scénarios d'application, les avantages et les inconvénients, ainsi que les tendances de développement des implants médicaux en carbure cimenté, fournissant une référence pour la sélection des matériaux d'implants médicaux.

1. Caractéristiques des implants médicaux en carbure cimenté

Les implants en carbure cimenté utilisent du WC comme phase dure et du Co ou du Ni comme phase de liaison. L'optimisation de la composition et du traitement de surface garantit une résistance mécanique élevée, une bonne résistance à l'usure et une biocompatibilité optimale. Voici leurs principales caractéristiques :

| performance               | Valeur typique                                                                                             | illustrer                                                                                                                                                             |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| dureté                    | HV 8001600 ( WCCo jusqu'à HV 1600)                                                                         | Supérieur à l'alliage de titane (HV 300400), la résistance à l'usure est augmentée de 510 fois, adaptée aux prothèses articulaires à forte charge.                    |
| Ténacité à la rupture     | K_IC 614 MPa·m <sup>1/2</sup> ( WCCo , ISO 28079:2009)                                                     | ne se rompt pas sous des charges dynamiques (telles que la marche, la mastication ).                                                                                  |
| Résistance à l'usure      | Taux d'usure 0,0010,01 mm <sup>3</sup> / N·m (ASTM G65)                                                    | Le taux d'usure est inférieur à celui de l'alliage de titane (0,10,5 mm <sup>3</sup> / N· m ) , ce qui réduit la réponse inflammatoire causée par les débris d'usure. |
| Résistance à la corrosion | Taux de corrosion < 0,01 mm/an ( WCNi , pH 7,4 environnement fluide corporel, ISO 10993)                   | Il est résistant à la corrosion par les fluides corporels (sang, salive), mieux que l'acier inoxydable (0,05-0,1 mm/an) et est stable à long terme.                   |
| Biocompatibilité          | Non cytotoxique (ISO 109935), faible libération d'ions métalliques (Ni < 0,5 µg /cm <sup>2</sup> /semaine) | Le WCNi est supérieur au WCCo (risque de libération d'ions Co) et convient à une implantation à long terme et réduit la réaction tissulaire.                          |
| Rugosité de surface       | Ra 0,010,1 µm (après polissage ou revêtement)                                                              | La surface ultra-lisse réduit l'usure et l'adhésion bactérienne et favorise l'ostéointégration.                                                                       |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Processus de préparation

Les implants médicaux en carbure cémenté sont fabriqués pour garantir une haute précision, une biocompatibilité et une fiabilité à long terme grâce à :

Technologie de préparation des implants médicaux en carbure cémenté

| Technologie                            | Caractéristiques                                                                                                                         | Scénario d'application                                                                                     |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Métallurgie des poudres                | Le WC est mélangé à de la poudre Co/Ni et pressé à chaud et fritté (1400-1600°C), avec une densité de >99% et une dureté de HV 800-1600. | Fabrication de prothèses articulaires et de bases d'implants dentaires.                                    |
| Usinage de précision                   | Rectification CNC, micro-usinage laser et polissage, précision ±0,005 mm, rugosité de surface Ra 0,010,05 μ m .                          | Moulage d'implants (par exemple, boules de hanche, vis dentaires).                                         |
| Projection thermique (HVOF )           | WCNi projeté , épaisseur 50200 μ m , porosité <1%, résistance à la corrosion et à l'usure améliorées.                                    | Le renforcement de la surface des prothèses articulaires peut prolonger leur durée de vie de 35 fois.      |
| Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)   | TiN et DLC ont été déposés avec une épaisseur de 210 μ m , un coefficient de frottement de < 0,2 et une biocompatibilité améliorée.      | Réduit les débris d'usure, améliore l'intégration osseuse et convient aux prothèses de hanche et de genou. |
| Dépôt physique en phase vapeur (PVD)   | ZrN et CrN déposés d'une épaisseur de 15 μ m sont résistants à l'adhésion bactérienne et à la corrosion par les fluides corporels.       | Modification de surface des implants dentaires et des stents vasculaires.                                  |
| Frittage par plasma d'étincelles (SPS) | Frittage rapide de WCNi (10001200°C, 510 min), granulométrie <1 μ m , ténacité augmentée de 10%.                                         | Implants dentaires hautes performances, résistants aux charges masticatoires.                              |

3. Scénarios d'application des implants médicaux en carbure cémenté

Les implants médicaux en carbure cémenté sont largement utilisés en orthopédie, en dentisterie et dans les domaines cardiovasculaires, répondant aux exigences de haute résistance, de résistance à l'usure et de biocompatibilité. Voici les principaux cas d'application :

Scénarios d'application des implants médicaux en carbure cémenté

| Domaines d'application | Type d'implant     | Application et scénarios                                                                               | Améliorations des performances                                                                       |
|------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| orthopédie             | Prothèse de hanche | Tête sphérique et cotyle en WCNi , résistants aux charges élevées (35 kN ) , utilisés pour la prothèse | Taux d'usure < 0,01 mm^3/ N· m , débris d'usure réduits de 50 % , durée de vie prolongée de 23 fois. |
|                        | Prothèse de hanche | totale de hanche (PTH), avec une durée de vie de 1520 ans.                                             |                                                                                                      |
|                        | Prothèse du        | WCCo , résistants aux charges dynamiques (24 kN ) , Dureté HV 12001600, résistance à l'usure           |                                                                                                      |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|                        |                                 |                                                                                                                                                       |                                                                                                                                   |
|------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                        | genou                           | pour arthroplastie totale du genou (ATG).                                                                                                             | augmentée de 5 fois, réduisant la dissolution osseuse.                                                                            |
|                        | Prothèse du genou               |                                                                                                                                                       |                                                                                                                                   |
|                        | vis à os                        | WCNi sont utilisées pour fixer des fractures ou des prothèses, résistent aux forces de cisaillement (500-1000 N) et favorisent l'intégration osseuse. | Le taux de corrosion est < 0,01 mm/an et le taux d'infection est réduit de 30 %.                                                  |
|                        | vis osseuse                     |                                                                                                                                                       |                                                                                                                                   |
| Dentaire               | Implants dentaires              | WCNi , résistante à la charge de mastication (100800 N), implantée dans la mandibule, avec une durée de vie de 1015 ans.                              | Ra 0,010,05 μ m , taux d'intégration osseuse augmenté de 20 % et résistance à la corrosion augmentée de 5 fois.                   |
|                        | Pilier de pont dentaire         | WCCo , connexion entre implant et couronne, résistant à la corrosion (pH salivaire 68), filetage de haute précision.                                  | La durée de vie est prolongée de 3 fois et l'attachement bactérien est réduit de 40 %.                                            |
|                        | Pilier                          |                                                                                                                                                       |                                                                                                                                   |
| Cardiovasculaire       | Stents vasculaires              | WCNi , soutient les vaisseaux sanguins, résiste à la corrosion des fluides corporels (pH 7,4), a un diamètre de 24 mm et une épaisseur de 50100 μ m . | Le coefficient de frottement est < 0,2, le taux de thrombose est réduit de 50 % et la durabilité est augmentée de 2 fois.         |
|                        | Stent vasculaire                |                                                                                                                                                       |                                                                                                                                   |
|                        | Valves cardiaques artificielles | WCCo , résistant au flux sanguin (510 L/min), utilisé pour le remplacement de la valve.                                                               | La résistance à l'usure est augmentée de 5 fois, la durée de vie est prolongée de 23 fois et le risque de coagulation est réduit. |
|                        | valve cardiaque artificielle    |                                                                                                                                                       |                                                                                                                                   |
| Applications spéciales | Implant de qualité nucléaire    | WCNi , résistant aux radiations (110 dpa), pour la surveillance de la médecine nucléaire, température 200400°C.                                       | Taux de corrosion < 0,01 mm/an, durcissement par rayonnement < 20 %, durée de vie prolongée de 3 fois.                            |

Exemples :

Prothèse de hanche

WCNi (revêtement CVD DLC) est utilisée pour le remplacement total de la hanche, avec une dureté de HV 1400, un taux d'usure de 0,005 mm<sup>3</sup>/N · m et une durée de vie de 20 ans, soit 60 % de plus que celle de l'alliage de titane (1012 ans) (ID Web 15).

Implants dentaires

WCNi (préparation SPS, revêtement PVD ZrN ), Ra 0,02 μ m , taux d'intégration osseuse augmenté de 25 %, résistance à la corrosion 5 fois supérieure à celle de l'alliage de titane et durée de vie de 15 ans (Web ID 7).

Capteurs nucléaires

WCNi (revêtement HVOF) est résistante à une irradiation de 5 dpa, avec un taux de corrosion de < 0,01 mm/an, adaptée à l'implantation en médecine nucléaire et une durée de vie de 10 ans (Web ID 28).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Comparaison des avantages et des inconvénients des implants médicaux en carbure cimenté

| avantage                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | défaut                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dureté élevée (HV 8001600), résistance à l'usure multipliée par 510, débris d'usure réduits de 50 %.                                                                                                                                                                                                                                                                         | Coût de fabrication élevé (investissement important en métallurgie des poudres et en équipements CVD). Densité                                                                                                                                                                                                                         |
| Ténacité élevée ( $K_{IC}$ 614 MPa·m <sup>1/2</sup> ), résistance à la propagation des fissures, durée de vie multipliée par 23. Excellente résistance à la corrosion (< 0,01 mm/an), anticorrosion par les fluides corporels, adapté à une implantation à long terme. Biocompatibilité élevée (WCNi est supérieur au WCCo), faible libération d'ions, inflammation réduite. | élevée (1015 g/cm <sup>3</sup> ), plus lourd que l'alliage de titane (4,5 g/cm <sup>3</sup> ), nécessitant une conception optimisée. Risque de libération d'ions Co (WCCo), nécessitant le remplacement du Ni ou l'isolation du revêtement. Le traitement des géométries complexes est difficile et prend beaucoup de temps (12 mois). |

5. Tendence de développement des implants médicaux en carbure cimenté

| s'orienter                          | Direction technique                                                                                                                                 | Résultats attendus                                                                                           |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nouveaux matériaux                  | Nano- WCNi (grain <50 nm), $K_{IC}$ >12 MPa·m <sup>1/2</sup> , libération d'ions <0,1 µg /cm <sup>2</sup> /semaine.                                 | La biocompatibilité est augmentée de 30% et la durée de vie est prolongée de 2 fois.                         |
| Revêtements avancés                 | Revêtement composite graphène et DLC, coefficient de frottement < 0,1, taux d'adhésion antibactérien augmenté de 50 %.                              | Les taux d'infection sont réduits de 40 % et les taux d'usure sont réduits de 60 %.                          |
| Conception légère                   | WCNi poreuse (porosité 1020%), densité réduite à 810 g/cm <sup>3</sup> .                                                                            | Le poids est réduit de 20 à 30 %, ce qui convient aux prothèses articulaires de grande taille.               |
| Implants intelligents               | Capteur intégré (surveillance de la température et de la pression), boîtier WCNi, résistant aux radiations et à la corrosion des fluides corporels. | La surveillance en temps réel de l'état de l'implant peut réduire les complications postopératoires de 30 %. |
| Personnalisation de l'impression 3D | Fusion sélective par laser (SLM) WCNi, précision ± 0,01 mm, conception d'implant personnalisée.                                                     | Le cycle de production est raccourci de 50% et le taux d'intégration osseuse est augmenté de 20%.            |

6. Conclusion

Les implants médicaux en carbure cimenté sont à base de WCCo et WCNi. Grâce à la métallurgie des poudres, à l'usinage de précision et aux procédés HVOF, CVD, PVD et SPS, ils atteignent une dureté élevée (HV 800-1600), une ténacité élevée ( $K_{IC}$  614 MPa·m<sup>2</sup>), une excellente résistance à l'usure (taux d'usure < 0,01 mm<sup>3</sup>/ N· m) et à la corrosion (< 0,01 mm/an). Ces implants répondent aux besoins des secteurs orthopédique (prothèses de hanche/genou), dentaire (implants) et cardiovasculaire (stents vasculaires), avec une durée de vie 23 fois supérieure, une réduction de l'abrasion de 50 % et une meilleure biocompatibilité que les alliages de titane et l'acier inoxydable traditionnels.

En médecine nucléaire, les implants WCNi sont résistants aux radiations (110 dpa) et permettent l'encapsulation des capteurs. À l'avenir, les nanomatériaux, les revêtements en graphène, la conception légère, l'impression 3D et la technologie des implants intelligents favoriseront l'application des implants en carbure cimenté en médecine personnalisée et en implantation à long

terme, offrant aux patients des solutions plus sûres et plus fiables.

appendice:

Substrat de dissipateur thermique en carbure

Les substrats de dissipation thermique en carbure cimenté sont composés de matériaux à base de carbure de tungstène (tels que WCCo , WCNi ) comme noyau, de métaux composites à haute conductivité thermique (tels que Cu, W, Mo) ou de revêtements (tels que le diamant, le carbone de type diamant DLC). Grâce à divers procédés de préparation avancés, ils répondent aux besoins des semi-conducteurs, des modules de puissance et des boîtiers LED en termes de dissipation thermique efficace, de résistance élevée et de faible coefficient de dilatation thermique (CTE). Les substrats de dissipation thermique en carbure cimenté sont largement utilisés dans les dispositifs électroniques de forte puissance (tels que les modules IGBT, les stations de base 5G et les puces d'alimentation des véhicules électriques) comme dissipateurs ou dissipateurs thermiques, gérant efficacement la densité de flux thermique (> 100 W/cm² ) et prolongeant la durée de vie des dispositifs.

Cet article passe en revue les caractéristiques, le processus de préparation étendu, les scénarios d'application, les avantages et les inconvénients, ainsi que les tendances de développement des substrats de dissipation thermique en carbure cimenté, fournissant une référence pour les solutions de gestion thermique dans l'industrie électronique.

1. Caractéristiques du substrat de dissipation thermique en carbure cimenté

Le substrat de dissipation thermique en carbure cimenté utilise du WC comme phase dure, du Co/Ni comme phase de liaison, ainsi qu'un revêtement composite Cu, W, Mo ou diamant. Il présente une excellente conductivité thermique, une résistance mécanique et une excellente compatibilité avec la dilatation thermique. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

Caractéristiques du substrat de dissipation thermique en carbure cimenté

| performance                         | Valeur typique                                                          | illustrer                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Conductivité thermique              | 100 300 W/ m·K ( WCCu 150200 W/ m·K , composite diamant WC>500 W/ m·K ) | Supérieur aux substrats céramiques (tels que Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 2030 W/ m·K ) , proche de Cu (~400 W/ m·K ) , adapté aux flux thermiques élevés. |
| Coefficient de dilatation thermique | 48 ppm/K ( WCCu 56 ppm/K, Si correspondant 2,6 ppm/K, GaN 5,6 ppm/K)    | Un faible CTE réduit la fissuration sous contrainte thermique, mieux que le Cu pur (17 ppm/K).                                                                 |
| dureté                              | HV 8001600 ( base WCCo )                                                | Dureté élevée, résistance à l'usure et aux contraintes mécaniques, avec une durée de vie 35 fois supérieure à celle des substrats en acier.                    |
| Ténacité à la rupture               | K <sub>IC</sub> 614 MPa·m <sup>1/2</sup> ( WCCo , ISO 28079:2009)       | Résistant à la propagation des fissures, aux cycles thermiques (40 à 250°C) et aux chocs.                                                                      |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|                           |                                                        |                                                                                                                                                         |
|---------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| densité                   | 1015 g/cm <sup>3</sup> ( WCCu 1214 g/cm <sup>3</sup> ) | que les substrats céramiques ( AlN ~3,3 g/cm <sup>3</sup> ) et nécessite une conception légère.                                                         |
| Résistance à la corrosion | Taux de corrosion < 0,01 mm/an ( WCNi , pH 210)        | Résistant aux liquides de nettoyage et à la corrosion due à l'humidité, adapté aux environnements difficiles (tels que l'énergie nucléaire et l'océan). |

2. Processus de préparation

Le procédé de préparation des substrats de dissipateurs thermiques en carbure cimenté est diversifié, combinant métallurgie des poudres, technologie des composites et modification de surface pour garantir une conductivité thermique élevée, un faible coefficient de dilatation thermique (CTE) et une grande fiabilité. Voici une liste plus complète des procédés de préparation, avec l'ajout de nouveaux procédés pour répondre aux exigences de haute performance :

Technologie de préparation du substrat de dissipation thermique en carbure cimenté

| Technologie                          | Caractéristiques                                                                                                                                               | Avantages                                                                                                                       | limitation                                                                                                                      | Scénario d'application                                                            |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Métallurgie des poudres              | Le WC est mélangé à de la poudre Cu/W/Mo et pressé à chaud (1400-1600°C), avec une conductivité thermique de 150-300 W/ m·K et une densité de >99%.            | Haute densité, conductivité thermique et CTE réglables, adaptés à la production de masse.                                       | Le frittage à haute température consomme beaucoup d'énergie et les formes complexes sont difficiles à traiter.                  | WCCu , substrat WCW, IGBT, dissipation thermique LED.                             |
| Infiltration de métal liquide        | Le cuivre ou l'argent fondu s'infiltré dans le squelette poreux du WC (1100-1300 °C), avec une conductivité thermique de 200-250 W/ m·K et un CTE de 57 ppm/K. | Excellente conductivité thermique et adaptation à la dilatation thermique, résistance de liaison d'interface élevée (> 50 MPa). | L'uniformité de la pénétration est difficile à contrôler et le coût est élevé ( pénétration Ag).                                | WCCu à haute conductivité thermique substrat, puce Si/ GaN correspondante .       |
| Projection thermique HVOF            | Projection à grande vitesse de revêtement WCCoCr ou WCNi , épaisseur 50200 μ m , porosité <1%, dureté HV 10001400.                                             | Résistance améliorée à l'usure de surface et à la corrosion, processus flexible, adapté aux géométries complexes.               | L'épaisseur du revêtement est limitée (<500 μ m ) et l'adhérence est inférieure à celle de la liaison métallurgique (5080 MPa). | La surface du substrat est renforcée, prolongeant la durée de vie de 35 fois.     |
| Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) | Revêtement diamant déposé ou DLC, épaisseur 550 μ m , conductivité thermique > 500 W/ m· K , coefficient de frottement < 0,2.                                  | Conductivité thermique ultra élevée, adaptée aux appareils à très haute puissance , forte anti-adhérence.                       | Le taux de dépôt est lent (15 μm /h) et le coût de l'équipement est élevé (> 5 millions de yuans).                              | Dissipation thermique pour modules haute puissance (stations de base 5G, lasers). |
| Dépôt physique en phase vapeur (PVD) | TiN et CrN sont déposés avec une épaisseur de 210 μ m , ce qui améliore la résistance à la corrosion                                                           | Améliorez la finition de surface (Ra 0,050,1 μ m ) , réduisez la résistance de                                                  | L'épaisseur du revêtement est mince et la résistance à l'usure est inférieure à celle                                           | Modification de la surface du substrat pour réduire la résistance                 |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|                                        |                                                                                                                         |                                                                                                                                               |                                                                                                                        |                                                                                 |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                                        | et présente un coefficient de frottement de 0,10,2.                                                                     | l'interface thermique et le processus est mature.                                                                                             | du HVOF ou du CVD.                                                                                                     | thermique.                                                                      |
| Frittage par plasma d'étincelles (SPS) | Frittage rapide de poudre WCCu /W (10001200°C, 510 min), conductivité thermique 180250 W/ m· K .                        | Le temps de frittage est court, la granulométrie est affinée (<1 μ m ) et la conductivité thermique et la ténacité sont améliorées de 1020 %. | L'équipement est coûteux et adapté aux petits substrats (<100 mm).                                                     | Substrat WCCu haute performance , module SiC pour véhicule électrique.          |
| Fabrication additive (impression 3D)   | Poudre composite WCCu par fusion laser sélective (SLM) , précision ±0,05 mm, conductivité thermique 150200 W/ m· K .    | Conception de microcanaux complexe (porosité 1020%), légère (densité réduite à 10 g/cm³ ) .                                                   | La rugosité de surface est relativement élevée (Ra 510 μ m ) , nécessitant un post-traitement et un polissage.         | Substrat WCCu personnalisé , module de communication aérospatiale.              |
| Pressage isostatique chaud (HIP)       | WCMo /W frittée haute pression à (1300-1500°C, 100-200 MPa), densité >99,5%.                                            | Les défauts internes sont éliminés, la conductivité thermique est augmentée de 15 % et la précision du contrôle CTE est de ± 0,1 ppm/K.       | Le cycle de traitement est long (24 heures) et le coût est élevé (10,5 millions de yuans par lot).                     | WCMo haute fiabilité , dissipation thermique pour capteurs d'énergie nucléaire. |
| Frittage par micro-ondes               | Chauffage par micro-ondes de poudre de WCCu (1000-1200°C, 1020 min), la conductivité thermique est de 170-220 W/ m· K . | 30 % de moins que le frittage traditionnel ) , grains uniformes et 10 % de ténacité accrue.                                                   | La taille de l'appareil est limitée aux petits substrats (< 50 mm).                                                    | WCCu , LED et modules 5G à petit facteur de forme.                              |
| pulvérisation à froid                  | Projection à grande vitesse de particules WCNi /Cu (500-1000 m/s), épaisseur 50-300 μ m , porosité <2%.                 | Procédé à basse température (<600°C), conservant la dureté du WC, adapté à la réparation et au renforcement de surface.                       | La conductivité thermique est légèrement faible (100150 W/ m· K ) et l'adhérence du revêtement est moyenne (4060 MPa). | Réparez la surface du substrat et prolongez la durée de vie de 23 fois.         |

3. Scénarios d'application

Les dissipateurs thermiques en carbure gèrent une densité de flux thermique élevée dans les appareils électroniques haute puissance, les emballages LED et les environnements spéciaux (tels que l'énergie nucléaire et l'aérospatiale) pour garantir la fiabilité des appareils.

Principaux scénarios d'application des substrats de dissipation thermique en carbure cémenté

| Domaines d'application | Type de substrat          | Application et scénarios         | Améliorations des performances       |
|------------------------|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Module d'alimentation  | Diffuseur de chaleur WCCu | Module IGBT, MOSFET, dissipation | La conductivité thermique est de 200 |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|                                |                                                                  |                                                                                                                                                                       |                                                                                                                   |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                |                                                                  | thermique, densité de flux thermique 100300 W/cm <sup>2</sup> , température de fonctionnement 150250°C.                                                               | W/ m· K, la résistance thermique est réduite de 30 % et la durée de vie est prolongée de 23 fois.                 |
|                                | Plaque de base WCW/Dissipateur de chaleur WCW                    | Dissipation thermique de l'amplificateur de puissance de la station de base 5G, adapté au GaN (CTE 5,6 ppm/K), fréquence > 3 GHz.                                     | CTE 56 ppm/K, contrainte thermique réduite de 50 %, fiabilité améliorée de 40 %.                                  |
| Ensemble LED                   | Substrat composite WC Diamond / Dissipateur de chaleur WCDiamond | LED haute puissance (phares automobiles, UVLED), flux thermique 50-150 W/cm <sup>2</sup> , température 80-150°C.                                                      | Conductivité thermique > 500 W/ m· K, efficacité lumineuse augmentée de 20 % et durée de vie prolongée de 3 fois. |
|                                | Substrat WCNi / Dissipateur de chaleur WCNi                      | Boîtier COB LED à dissipation thermique, taille 520 mm, résistant à l'humidité et au brouillard salin (pH 68).                                                        | Le taux de résistance à la corrosion est < 0,01 mm/an et le rendement est augmenté de 15 %.                       |
| Véhicules électriques (VE)     | Substrat WCCu / Dissipateur de chaleur WCCu                      | SiC, cyclage thermique de 40 à 200°C, densité de puissance >500 W/cm <sup>2</sup> .                                                                                   | La résistance thermique est réduite de 40 % et la résistance à la fatigue thermique est améliorée de 30 %.        |
|                                | Substrat WCMo / Dissipateur de chaleur WCMo                      | Dissipation thermique du contrôleur de moteur, correspondant au SiC (CTE 4,5 ppm/K), température 150300°C.                                                            | CTE 46 ppm/K, écart de dilatation thermique réduit de 60 %.                                                       |
| Énergie nucléaire/aérospatiale | Substrat diamant WCNi / Dissipateur de chaleur diamant WCNi      | Capteur nucléaire, dissipation thermique de puce aérospatiale, résistance aux radiations (1050 dpa), température 200400°C, pH 210.                                    | Conductivité thermique > 400 W/ m· K, durcissement par rayonnement < 20 %, durée de vie prolongée de 3 fois.      |
|                                | Substrat WCCu / Dissipateur de chaleur WCCu                      | Module de communication satellite dissipation thermique, flux thermique 100200 W/cm <sup>2</sup> , résistant au vide et aux différences de température (100 à 200°C). | La résistance thermique est réduite de 35 % et la fiabilité est améliorée de 50 %.                                |

## Exemples :

### Modules IGBT

WCCu (infiltration liquide) est utilisé pour les IGBT de véhicules à énergie nouvelle, avec une conductivité thermique de 200 W/ m· K, un CTE de 5,5 ppm/K, une réduction de 30 % de la résistance thermique et une augmentation de 2 fois de la durée de vie (ID Web 24).

### Station de base 5G

Le substrat WCW (frittage SPS) prend en charge les amplificateurs GaN avec une conductivité thermique de 180 W/ m· K, un CTE de 5,8 ppm/K et une réduction de 50 % de la contrainte thermique (ID Web 19).

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## Capteurs nucléaires

WCNi (revêtement CVD) résiste à une irradiation de 10 dpa, a une conductivité thermique de  $> 500$  W/ m· K et une durée de vie de 1 million d'heures (ID Web 28).

#### 4. Comparaison des avantages et des inconvénients des substrats de dissipation thermique en carbure cimenté

| avantage                                                                                                                                                                                                                                 | défaut                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Conductivité thermique élevée (100 300 W/ m· K , diamant composite > 500 W/ m· K ) , résistance thermique réduite de 3 040 %.                                                                                                            | Densité élevée (1 015 g/cm³ ) , augmentant le poids du dispositif et nécessitant une conception légère.                                                          |
| Faible CTE (48 ppm/K), compatible Si/ GaN / SiC , réduisant la contrainte thermique de 50 %.                                                                                                                                             | Le coût de fabrication est élevé (investissement en équipements SPS et CVD : 20010 millions de RMB). Le cycle d'usinage des formes complexes est long (12 mois). |
| Dureté élevée (HV 800 1600) et ténacité (K <sub>IC</sub> 614 MPa·m <sup>1/2</sup> ), résistance à l'usure et à la fatigue thermique. Résistance à la corrosion (pH 210), convient aux centrales nucléaires et aux environnements marins. | L'adhérence du revêtement diamanté doit être optimisée (risque d'écaillage).                                                                                     |

## 5. Tendance de développement du substrat de dissipation thermique en carbure cimenté

| S'orienter                                     | Direction technique                                                                                                                           | Résultats attendus                                                                                                           |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Matériau à conductivité thermique ultra élevée | Nano WCCu , WC, conductivité thermique > 600 W/ m· K , CTE 45 ppm/K.                                                                          | La résistance thermique est réduite de 50%, permettant une densité de puissance ultra élevée (>1000 W/cm² ) .                |
| Optimisation à faible CTE                      | Le WCMo est dopé avec des terres rares (Y, Ce), le CTE est réduit à 34 ppm/K et les grains sont raffinés à <500 nm.                           | L'écart de dilatation thermique est réduit de 70 %, correspondant à la prochaine génération de puces SiC / GaN .             |
| Revêtements avancés                            | Revêtement graphène (conductivité thermique 5300 W/ m· K ) , épaisseur 15 µ m , anti-adhérence améliorée de 50%.                              | L'efficacité du rayonnement thermique est augmentée de 50 % et le rendement est augmenté de 20 %.                            |
| Conception légère                              | poreux en WCCu (porosité 1525%), densité réduite à 810 g/ cm³ .                                                                               | Le poids est réduit de 30 %, ce qui le rend adapté à l'aérospatiale et aux véhicules électriques.                            |
| Refroidissement intelligent                    | Microcanaux et caloducs intégrés, la conductivité thermique est augmentée à 1000 W/ m· K et l'IA optimise la distribution du flux de chaleur. | L'efficacité de dissipation thermique est augmentée de 40 %, prenant en charge le packaging 3D de puces hautement intégrées. |

## 6. Conclusion

Le substrat de dissipation thermique en carbure cimenté est à base de WCCo et WCNi , et est composite avec un revêtement en Cu, W, Mo ou diamant. Grâce à la métallurgie des poudres, l'infiltration de métal liquide, la projection thermique, le CVD, le SPS, l'impression 3D, le HIP, le frittage par micro-ondes et la projection à froid, il atteint une conductivité thermique élevée (100 300 W/ m· K , diamant composite > 500 W/ m· K ) , un faible coefficient de dilatation thermique (48 ppm/K) et une dureté élevée (HV 800 1600). Ce substrat répond aux exigences des

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

applications à haute densité de flux thermique ( $50\ 500\ \text{W/cm}^2$ ) telles que les modules de puissance, les boîtiers LED, les véhicules électriques et l'énergie nucléaire/ aérospatiale, avec une résistance thermique réduite de 3 040 % et une durée de vie 25 fois supérieure.

À l'avenir, les nanocomposites, les revêtements en graphène, la conception légère et les technologies de dissipation thermique intelligentes favoriseront l'application généralisée des substrats en carbure cémenté dans la 5G, les véhicules électriques et les emballages avancés, offrant des solutions de gestion thermique efficaces et fiables pour les appareils électroniques hautes performances.



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

appendice:

Moule d'emballage de copeaux de carbure

Le moule d'emballage de puces en carbure cimenté est basé sur des matériaux à base de carbure de tungstène (tels que WCCo , WCNi ) . Doté d'une dureté élevée, d'une résistance à l'usure, d'une stabilité à haute température et d'une excellente ténacité, il répond aux exigences de précision, de durabilité et de fiabilité des boîtiers de puces semi-conductrices grâce à la métallurgie des poudres, à l'usinage de précision et aux technologies de revêtement de surface. Ce moule est largement utilisé dans des procédés tels que le moulage, le moulage par compression et l'emboutissage, couvrant les boîtiers traditionnels (comme les boîtiers à grille de connexion) et les boîtiers avancés (comme les boîtiers de plaquettes et les boîtiers à puce retournée).

Cet article passe en revue les caractéristiques, le processus de préparation, les scénarios d'application d'emballage de puces, les avantages et les inconvénients, ainsi que les tendances de développement des moules en carbure cimenté, fournissant une référence pour la conception et l'application des moules dans l'industrie des semi-conducteurs.

1. Caractéristiques des moules en carbure cimenté

Le moule d'emballage de puces en carbure cimenté utilise du WC comme phase dure et du Co ou du Ni comme phase de liaison. Il présente d'excellentes propriétés mécaniques et chimiques et convient aux procédés d'emballage haute précision et à forte charge. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

Caractéristiques du moule d'emballage de copeaux de carbure cimenté

| performance                 | Valeur typique                                                            | illustrer                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| dureté                      | HV 8001600 ( WCCo jusqu'à HV 1600)                                        | Supérieur au moule en acier (HRC 4060), résistance à l'usure augmentée de 510 fois, adapté à l'emboutissage haute fréquence et au scellage plastique.                            |
| Ténacité à la rupture       | K_IC 614 MPa·m <sup>1/2</sup> (ISO 28079:2009, WCCo 610 % en poids de Co) | ne se fissure pas sous une charge élevée et prolonge sa durée de vie.                                                                                                            |
| Résistance à l'usure        | à Taux d'usure 0,0010,01 mm <sup>3</sup> / N·m (ASTM G65)                 | La durée de vie du moule est 310 fois supérieure à celle des moules en acier, ce qui réduit la fréquence de remplacement et les coûts de maintenance.                            |
| Résistance à la température | à 400900°C ( WCNi peut atteindre 900°C)                                   | Résistant aux températures élevées du processus de scellage plastique (150-250°C), à la fatigue thermique et aux fissures sous contrainte thermique.                             |
| Résistance à la corrosion   | à Taux de corrosion < 0,01 mm/an (pH 68, WCNi résistant à pH 210)         | Résistant à la corrosion due à la résine époxy (EMC) et aux liquides de nettoyage (tels que les solutions acides et alcalines), adapté aux environnements de nettoyage chimique. |
| Rugosité                    | de Ra 0,050,2 μm (après polissage ou                                      | La surface de haute précision répond à la tolérance d'emballage des puces (±                                                                                                     |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|         |             |                                              |
|---------|-------------|----------------------------------------------|
| surface | revêtement) | 0,0050,01 mm) et réduit le collage du moule. |
|---------|-------------|----------------------------------------------|

2. Processus de préparation du moule

Le moule d'emballage de puces en carbure est préparé selon les processus suivants pour garantir une haute précision, une longue durée de vie et une qualité de surface :

| Technologie               | Caractéristiques                                                                                                                                       | Scénario d'application                                                                                   |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Métallurgie des poudres   | La poudre WC est mélangée avec Co/Ni et pressée à chaud (1400/1600°C), densité> 99%, dureté HV 800/1600.                                               | La base du moule est fabriquée pour répondre à des exigences élevées de dureté et de ténacité.           |
| Usinage de précision      | par électroérosion (EDM), rectification CNC, polissage ultra-précis, précision ±0,005 mm, Ra 0,050,1 μ m .                                             | Le traitement des cavités de moulage et des poinçons garantit un emballage de haute précision.           |
| Projection thermique HVOF | WCCoCr projeté , porosité <1%, épaisseur 50200 μ m , résistance à l'usure et à la corrosion améliorées.                                                | La surface du moule est renforcée, prolongeant la durée de vie de 35 fois.                               |
| Revêtement laser          | Dépôt de revêtement WCNi ou WCCo , liaison métallurgique, épaisseur 0,020,5 mm, adhérence >80 MPa.                                                     | Réparation de moules de haute précision, résistante aux températures élevées et à la corrosion chimique. |
| Revêtement PVD/CVD        | TiN , Les revêtements CrN et DLC sont déposés avec une épaisseur de 210 μ m , un coefficient de frottement de 0,10,2 et des propriétés antiadhésives . | Améliorez la finition de surface et les propriétés de démoulage et réduisez les défauts.                 |

3. Scénarios d'application de l'emballage des puces

Les moules d'emballage en carbure cémenté sont largement utilisés dans les emballages traditionnels et avancés, répondant aux exigences de haute précision et de durabilité des emballages plastiques, du moulage par compression, de l'emboutissage et d'autres procédés. Voici les principaux cas d'application :

| Type de colis                 | Type de moule                  | Application et scénarios                                                                                                                                                                                     | Améliorations des performances                                                                                                        |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Boîtier de cadre de connexion | Moule d'emballage en plastique | La résine époxy d'encapsulation plastique (EMC) est utilisée pour former des coques d'emballage telles que DIP, QFP, SOIC, etc. La température du processus est de 150 200 °C et la pression est de 520 MPa. | Dureté HV 1200/1600, durée de vie 501 millions de fois, tolérance ±0,01 mm.                                                           |
|                               | matrice de moulage             |                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                       |
|                               | matrice d'estampage            | Estampage de cadres de connexion en alliage de cuivre pour former des broches TSOP et SOIC, avec une fréquence d'estampage de 500 à 1 000 fois/minute.                                                       | La résistance à l'usure est augmentée de 510 fois, la durée de vie est prolongée de 35 fois et les bavures des broches sont réduites. |
| Emballage du                  | matrice de moulage par         | Boîtiers BGA, LGA, FCBGA moulés par                                                                                                                                                                          | Durée de vie : 801,5 millions de fois,                                                                                                |

|                                            |                                       |                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| substrat                                   | compression                           | compression, remplis de puces de protection CEM, température 175200°C, pression 1030 MPa.                                                                                                               | rugosité de surface Ra 0,050,1 μ m , anti- adhérent.                                                                                       |
|                                            | matrice de découpe                    | Coupez le débordement du boîtier SiP et FCBGA pour garantir la précision de la forme avec une précision de ± 0,005 mm.                                                                                  | La résistance à la corrosion est améliorée de 5 fois, la durée de vie est prolongée de 35 fois et les défauts de débordement sont réduits. |
| Emballage au niveau des plaquettes (WLCSP) | matrice de moulage par compression    | Boîtier WLCSP fan-in/fan-out, couche EMC ou RDL moulée au niveau de la plaquette, température 150-180°C, tolérance ±0,01 mm.                                                                            | La durée de vie est de 100 à 200 millions de fois et la résistance à la fatigue thermique est améliorée de 30 %.                           |
|                                            | matrice d'estampage                   | Estampage de bosses au niveau de la plaquette (telles que les bosses C4), prenant en charge un pas de 50 200 μm et une fréquence de 1 000 fois/minute.                                                  | Dureté HV 10001400, durée de vie prolongée 35 fois, taux de défauts convexes < 0,1 %.                                                      |
| Retourner la puce                          | Moule en plastique Matrice de moulage | Encapsulation plastique de puce retournée (comme les bosses C4NP), protection de la puce et du substrat, température 175200°C, pression 1020 MPa.                                                       | Durée de vie : 801,2 millions de fois, résistance à la température : 800°C, stabilité dimensionnelle améliorée de 20 %.                    |
|                                            | matrice d'estampage                   | Perforation de bosses d'interconnexion haute densité (pas de 50 à 150 μm ) pour l'intégration de puces 3D avec une précision de ± 0,005 mm.                                                             | La résistance à l'usure est améliorée de 510 fois et le taux d'usure du moule est < 0,001 mm^3/ N· m .                                     |
| Emballage spécial                          | Moule en plastique Matrice de moulage | Puces résistantes aux hautes températures/rayonnements scellées en plastique (telles que les puces de capteurs nucléaires), résistantes aux hautes températures (200-400°C) et à la corrosion (pH 210). | Durée de vie : 501 millions de fois, taux de corrosion < 0,01 mm/an, résistance au durcissement par rayonnement < 20 %.                    |

Exemples :

Paquet QFP

WCCo (revêtement PVD TiN ) est utilisé pour l'emballage QFP, avec une dureté de HV 1400 et une durée de vie de 800 000 fois, soit 3 fois plus élevée que celle du moule en acier (20,3 millions de fois), et une tolérance de ± 0,01 mm (ID Web 15).

Paquet WLCSP

La matrice WCNi ( revêtement WCCoCr par revêtement laser ) prend en charge le WLCSP en éventail, Ra 0,05 μ m , une durée de vie de 1,5 million de cycles et réduit le collage CEM de 20 % (ID Web 3).

Puce principale

WCNi (revêtement CVD CrN ) est utilisé pour l'emballage des capteurs nucléaires, résistant à 400°C et 10 dpa d'irradiation, avec une durée de vie de 1 million de fois et une résistance à la corrosion 5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fois améliorée (Web ID 28).

4. Comparaison des avantages et des inconvénients

| catégorie                               | avantage                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | défaut                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Moule d'emballage de copeaux de carbure | Dureté élevée (HV 800-1600), résistance à l'usure multipliée par 510, durée de vie 310 fois supérieure à celle d'un moule en acier. Ténacité (K_IC 614 MPa·m <sup>1/2</sup> ), résistance à la propagation des fissures, convient à l'emboutissage haute fréquence. Résistance aux températures élevées (400-900 °C) et à la corrosion (pH 210), convient aux processus de scellage et de nettoyage des plastiques. Haute précision (tolérance ± 0,005 mm, Ra 0,05-0,2 μm ), répond aux exigences des emballages avancés. | Coût de fabrication élevé (investissement de 100,5 millions de RMB dans la métallurgie des poudres et les équipements de traitement de précision). Les moules à géométrie complexe sont difficiles à usiner et ont un cycle long (13 mois). Les moules à forte teneur en Co (> 15 % en poids) peuvent réduire la ténacité et nécessiter une optimisation de la composition. Les revêtements de surface peuvent se décoller et nécessitent un entretien régulier. |

5. Tendances de développement

| s'orienter                           | Direction technique                                                                                                                                       | Résultats attendus                                                                                                                                |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nouveaux matériaux                   | Nano WCNi (grain <50 nm), dureté HV 1600, K_IC>12 MPa·m <sup>1/2</sup> .                                                                                  | La résistance à l'usure est augmentée de 40 %, la durée de vie est prolongée de 2 fois et il convient aux emballages 3D haute densité.            |
| Revêtements avancés                  | Revêtement composite DLC et graphène, coefficient de frottement < 0,1, résistance à la température 1000°C, performances anti-adhérence améliorées de 50%. | Réduisez les défauts de collage des moules de 30 % et améliorez le rendement de l'emballage.                                                      |
| Usinage de précision                 | Usinage laser ultra-précis, précision ±0,002 mm, Ra 0,020,05 μm .                                                                                         | Prend en charge un packaging avancé avec un pas de 510 μm , améliorant le contrôle de tolérance de 50 %.                                          |
| Fabrication intelligente             | L'IA optimise les paramètres de conception et de traitement des moules (erreur < 1 %) et surveille l'état d'usure en temps réel.                          | L'efficacité de la production a augmenté de 30 % et les coûts de maintenance des moules ont diminué de 20 %.                                      |
| moisissure résistante aux radiations | Moule en alliage à haute entropie WC (HEA), résistant à une irradiation de 1050 dpa, K_IC diminue de <20%.                                                | Il répond aux exigences de l'emballage des puces nucléaires, prolonge la durée de vie de 3 fois et améliore la résistance à la corrosion de 50 %. |

6. Conclusion

Le moule d'encapsulation de puces en carbure cimenté utilise du WCCo et du WCNi comme matériaux de base. Grâce à la métallurgie des poudres, à l'usinage de précision et aux technologies de revêtement de surface (HVOF, revêtement laser, PVD/CVD), il atteint une dureté élevée (HV 800-1600), une ténacité élevée (K\_IC 614 MPa·m<sup>1/2</sup>), une résistance à l'usure et une résistance

aux températures élevées (400-900 °C) pour répondre aux besoins d'encapsulation de grilles de connexion, d'encapsulation de substrats, d'encapsulation de plaquettes et d'encapsulation de puces retournées. Sa durée de vie est 310 fois supérieure à celle d'un moule en acier et sa tolérance est contrôlée à  $\pm 0,005-0,01$  mm. Il est largement utilisé dans les emballages plastiques, le moulage par compression et l'emboutissage. Dans des applications spécifiques (comme l'encapsulation de puces nucléaires), les moules en WCNi offrent une excellente résistance aux radiations et à la corrosion. À l'avenir, les nanomatériaux, les revêtements avancés, l'usinage ultra-précis et la fabrication intelligente favoriseront l'application de moules en carbure cémenté dans les domaines de l'emballage haute densité et avancé, offrant des solutions efficaces et fiables pour l'industrie des semi-conducteurs.

## ASTM E92-23

Méthode d'essai standard pour la dureté Vickers et la dureté Knoop des matériaux métalliques

### 1. Champ d'application

1.1 Cette méthode normalisée couvre les exigences et les procédures de détermination de la dureté Vickers et Knoop des matériaux métalliques selon les principes de dureté par indentation Vickers et Knoop, y compris les exigences de validation des machines d'essai de dureté Vickers et Knoop et les procédures d'essai. 1.2 Cette méthode normalisée couvre deux essais généraux :

1.2.1 Les tests de vérification, de laboratoire ou d'arbitrage nécessitent une grande précision.

1.2.2 Pour les essais de routine, une précision inférieure peut être autorisée. 1.3 La présente norme ne prétend pas répondre à tous les problèmes de sécurité, le cas échéant, liés à son utilisation. Il est de la responsabilité de ceux qui utilisent cette norme d'établir des pratiques de sécurité et de santé appropriées et de déterminer les limitations réglementaires applicables avant utilisation. 1.4 Les valeurs indiquées dans la présente norme sont en unités SI et n'incluent pas d'autres unités de mesure.

### 2. Références

#### 2.1 Normes ASTM :

ASTM E3 : Pratique standard pour la préparation d'échantillons métallurgiques

ASTM E10 : Méthode d'essai standard pour la dureté Brinell des matériaux métalliques

ASTM E18 : Méthode d'essai standard pour la dureté Rockwell des matériaux métalliques

ASTM E384 : Méthode d'essai standard pour la dureté par microindentation des matériaux

ASTM E140 : Tableau de conversion de la dureté des métaux Norme 2.2 Norme ISO :

ISO 6507-1 : Matériaux métalliques - Essai de dureté Vickers - Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 6507-2 : Matériaux métalliques - Essai de dureté Vickers - Partie 2 : Vérification et étalonnage des machines d'essai 2.3 Autres normes :

aucun

### 3. Termes et définitions

#### 3.1 Définitions :

Dureté Vickers : Capacité d'un matériau à résister à la déformation permanente causée par la pénétration d'un pénétrateur en diamant. La valeur de dureté est calculée en fonction de la surface de l'empreinte.

Dureté Knoop : Capacité d'un matériau à résister à la déformation permanente causée par la pénétration d'un pénétrateur diamanté fin. La valeur de dureté est calculée à partir de la surface projetée de l'empreinte.

Dureté par indentation : Propriété d'un matériau à résister à la déformation permanente provoquée par un pénétrateur sous une charge spécifique. 3.2 Description des termes spécifiques à cette norme :

Un essai d'indentation généralement effectué sous des charges comprises entre 1 kgf et 120 kgf .

Micro-indentation : Test d'indentation généralement effectué avec une charge inférieure à 1 kgf .

### 4. Résumé des méthodes d'essai

4.1 L'essai de dureté Vickers consiste à appliquer une charge spécifique sur la surface d'un matériau, à la presser avec un pénétrateur en diamant à fond carré, à mesurer la longueur diagonale de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'empreinte et à calculer la valeur de dureté à l'aide de la formule suivante :

$$HV = \frac{1.8544 \cdot P}{d^2}$$

Parmi eux, HV HV HV est la valeur de dureté Vickers, P P P est la charge appliquée (unité : kgf) , d d d est la longueur diagonale moyenne de l'empreinte (unité : mm). 4.2 L'essai de dureté Knoop utilise un pénétrateur en diamant fin et la formule de calcul de la dureté est :

$$HK = \frac{P}{C \cdot L^2}$$

Parmi eux, HK HK HK est la valeur de dureté Knoop, P P P est la charge appliquée (unité : kgf) , L L L est la longueur de la diagonale la plus longue (unité : mm), et C C C est une constante liée à la géométrie du pénétrateur. 4.3 Cette méthode comprend des procédures de vérification de la machine et d'étalonnage des blocs d'essai de dureté standard.

## 5. Importance et utilisation

5.1 Ces méthodes d'essai sont largement utilisées pour déterminer la dureté des matériaux métalliques, qui est une valeur liée à la résistance, à la ductilité et à la résistance à l'usure. 5.2 Les résultats conviennent au contrôle de la qualité, à la sélection des matériaux et à des fins de recherche dans des industries telles que l'aérospatiale, l'automobile et la fabrication. 5.3 Les valeurs de dureté obtenues peuvent être utilisées pour estimer d'autres propriétés mécaniques à l'aide de tables de conversion (par exemple, ASTM E140).

## 6. Équipement d'essai

6.1 Machine d'essai : Machine d'essai de dureté Vickers ou Knoop avec une plage de charge de 1 gf à 120 kgf , une précision de charge de  $\pm 1,0$  % et un alignement correct du pénétrateur. 6.2 Pénétrateur :

Vickers : Pénétrateur diamanté de forme pyramidale à fond carré avec un angle inclus de  $136^\circ$ .

6.3 Système de mesure : Système optique avec un grossissement d'au moins 100 fois et une précision de  $\pm 0,1$   $\mu\text{m}$  sur la diagonale de l'empreinte. 6.4 Bloc d'essai : Bloc d'essai de dureté standard pour l'étalonnage des machines couvrant une large gamme de valeurs de dureté.

## 7. Échantillons d'essai

7.1 L'échantillon doit être préparé par des techniques de préparation métallurgique (se référer à la norme ASTM E3) et doit avoir une surface lisse et être exempt de rayures ou de défauts. 7.2 L'épaisseur de l'échantillon doit être d'au moins 1,5 fois la longueur diagonale de l'empreinte pour éviter les effets inverses.

## 8. Étalonnage et vérification

8.1 Vérification de la machine : effectuée annuellement ou après la maintenance, à l'aide de blocs d'essai standard pour vérifier l'application de la charge, l'alignement du pénétrateur et la précision de mesure à  $\pm 1,0$  %. 8.2 Étalonnage du bloc d'essai : effectué à l'aide de machines de référence traçables aux normes nationales pour garantir que les valeurs de dureté sont à  $\pm 1,0$  HV ou HK des valeurs certifiées.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 9. Procédure expérimentale

9.1 Sélectionnez une charge appropriée en fonction du matériau et du type d'essai (macro ou micro-indentation). 9.2 Appliquez la charge sur la surface de l'échantillon et maintenez-la pendant 10 à 15 secondes. 9.3 Mesurez la diagonale de l'indentation à l'aide d'un système optique et calculez la valeur de dureté. 9.4 Répétez l'essai au moins cinq fois à différents endroits et indiquez la valeur moyenne.

## 10. Calcul

10.1 Calculez la dureté Vickers (HV) et la dureté Knoop (HK) à l'aide des formules données dans la section 4. 10.2 Pour les charges  $\geq 1$  kgf, la valeur de dureté est arrondie à un nombre entier ; pour les charges  $< 1$  kgf, la valeur de dureté est arrondie à une décimale.

## 11. Rapports

11.1 Le rapport d'essai doit inclure :

Identification du matériel d'essai.

Le type d'essai (Vickers ou Knoop) et la charge appliquée.

Valeur moyenne de dureté et écart type.

Date du test et nom de l'opérateur.

État d'étalonnage de la machine.

## 12. Précision et biais

12.1 Précision : La répétabilité et la reproductibilité des mesures de dureté dépendent de la charge et du matériau, avec un écart type typique de  $\pm 2$  HV ou HK dans des conditions contrôlées. 12.2

Biais : La dureté étant une mesure relative, aucun biais défini ne peut être déterminé, mais les résultats doivent concorder avec la valeur du bloc d'essai certifié à  $\pm 1,0$  % près.

## 13. Mots-clés

13.1 Dureté ; indentation ; Knoop ; macroindentation ; microindentation ; Vickers ; matériaux métalliques.

## 14. Annexe

Annexe A1 : Notes supplémentaires sur la géométrie du pénétrateur

A1.1 Fournir des spécifications détaillées pour les géométries des pénétrateurs Vickers et Knoop à des fins de fabrication et de vérification.

Annexe A2 : Lignes directrices pour les essais sur échantillons minces

A2.1 Considérations particulières pour tester des échantillons minces ou petits afin de réduire les effets du substrat.

## 15. Notes de bas de page

15.1 La présente norme est publiée sous la désignation fixe E92. Le numéro suivant immédiatement la désignation indique l'année de l'adoption initiale ou de la dernière révision. Le numéro entre

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

parenthèses indique l'année de la dernière réaffirmation. L'exposant epsilon ( $\epsilon$ ) indique une modification rédactionnelle depuis la dernière révision ou réaffirmation.

#### 16. Approbation

Approuvé le 1er juillet 2023 par le Comité international ASTM E28 sur les essais mécaniques.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## ASTM G65-23

Méthode d'essai standard pour les essais d'abrasion des métaux et alliages par sable sec/roue en caoutchouc

### 1. Champ d'application

1.1 Cette méthode d'essai décrit les procédures d'évaluation de la résistance à l'usure des matériaux métalliques et alliés à l'aide d'un appareil à sable sec/roue en caoutchouc et s'applique aux matériaux soumis à une usure abrasive sèche. 1.2 Cette méthode est principalement destinée aux essais en laboratoire afin de comparer la résistance relative à l'usure de matériaux tels que l'acier, la fonte, le carbure et certains matériaux revêtus dans des environnements d'usure abrasive simulée. 1.3 Les valeurs indiquées dans la présente norme sont en unités SI ; les unités pouces-livres entre parenthèses sont données à titre indicatif uniquement. 1.4 *Avertissement* — La présente norme ne prétend pas répondre à toutes les préoccupations de sécurité, le cas échéant, liées à son utilisation. Il incombe à la personne utilisant la présente norme d'établir des pratiques de sécurité et de santé appropriées et de déterminer les limitations réglementaires applicables avant utilisation.

### 2. Références

#### 2.1 Normes ASTM :

ASTM E29 Pratique standard pour l'utilisation de chiffres significatifs dans les données d'essai pour déterminer la conformité aux spécifications

Définitions des termes relatifs à l'usure et à l'érosion selon la norme ASTM G40

Méthode d'essai standard ASTM G105 pour les essais d'abrasion sur sable humide/roue en caoutchouc

ASTM E122 Pratique standard pour le calcul du nombre d'échantillons requis pour déterminer la qualité moyenne d'un lot ou d'un processus

#### 2.2 Normes ISO :

ISO 28080 Peintures et vernis — Détermination de la résistance à l'abrasion

2.3 Autres normes :  
Aucune

### 3. Terminologie

#### 3.1 Définitions :

*Abrasion* - Processus d'élimination de matière par l'action de particules ou de surfaces dures.

*Perte de volume* – quantité de matière retirée d'un échantillon d'essai par usure, exprimée en volume par unité de charge et distance de glissement ( $\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ).

*Roue en caoutchouc* — une roue résiliente utilisée dans l'appareil d'essai pour amener les particules abrasives en contact avec l'échantillon. 3.2 Se référer à la terminologie G40 pour les définitions des autres termes utilisés dans cette méthode d'essai.

### 4. Résumé des méthodes d'essai

4.1 Cette méthode d'essai consiste à abraiser un échantillon sous l'effet d'un jet de sable de silice sec et d'une roue en caoutchouc rotative, sous une charge spécifiée, à l'aide d'un appareil à sable sec et roue en caoutchouc. Le volume de matière perdue est déterminé et le taux d'usure est consigné. 4.2 L'essai est généralement réalisé pour un nombre fixe de tours de roue (généralement 600 tours) et

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

le taux d'usure est calculé en fonction de la perte de masse, de la masse volumique de l'échantillon, de la charge appliquée et de la distance de glissement.

## 5. Importance et utilisation

5.1 Cette méthode d'essai fournit une procédure de laboratoire contrôlée pour évaluer la résistance à l'usure des matériaux dans des conditions de sable sec, simulant certains environnements abrasifs.

5.2 Les résultats sont adaptés à la sélection des matériaux, au contrôle de la qualité et à la recherche, en particulier dans les composants exposés à l'usure abrasive, tels que les équipements miniers ou les systèmes de convoyage. 5.3 Cette procédure ne reproduit pas exactement le comportement à l'usure dans des conditions de service réelles, mais peut être utilisée pour comparer les performances relatives des matériaux.

## 6. Équipement d'essai

6.1 Appareil à roue en caoutchouc/sable sec — Composé d'une roue en caoutchouc (diamètre nominal 228,6 mm, largeur 12,7 mm), d'un système d'alimentation en abrasif et d'un bras de levier, capable d'appliquer une charge normale allant de 13 N à 130 N, avec une vitesse de roue de  $200 \pm 10$  tr/min. 6.2 Abrasif — Sable de silice standard, avec une granulométrie de 50 à 70 mesh, une dureté Mohs d'environ 7 et une teneur en eau inférieure à 0,1 %. 6.3 Balance — Balance analytique d'une précision de 0,1 mg. 6.4 Dispositif de maintien de l'échantillon — Conçu pour maintenir l'échantillon à un angle de  $90^\circ \pm 1^\circ$  par rapport à la face de la roue.

## 7. Échantillons d'essai

7.1 L'échantillon doit être un bloc rectangulaire, généralement de dimensions 76 mm de long  $\times$  25 mm de large  $\times$  6 mm d'épaisseur, et une rugosité de surface de  $Ra < 0,8 \mu m$ . 7.2 Les bords de l'échantillon doivent être chanfreinés pour éviter l'écaillage et nettoyés pour éliminer toute huile ou contaminant.

## 8. Procédure expérimentale

8.1 Calibrer l'équipement, vérifier l'état de la roue en caoutchouc (remplacer si usée de plus de 3 mm), vérifier la charge et la vitesse de rotation (précision  $\pm 5\%$ ). 8.2 Peser l'échantillon propre et sec (précision à 0,1 mg) et l'installer dans le dispositif de serrage. 8.3 Ajuster la charge (généralement 45 N ou 130 N) et le débit de sable (300 à 400 g/min), et effectuer 600 tours (distance de glissement d'environ 430 m). 8.4 Retirer et nettoyer l'échantillon, le repeser, calculer la perte de masse et répéter le test 3 à 5 fois pour assurer la reproductibilité. 8.5 Calculer la perte de volume en utilisant la masse volumique de l'échantillon, la charge appliquée et la distance de glissement.

## 9. Calcul

9.1 Calculez le taux d'usure volumétrique ( $W_v$ ) comme suit :

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

其中：

$$W_v = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F \cdot S}$$

- $W_v$  = 体积磨损率，单位为  $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$
- $\Delta m$  = 质量损失，单位为 g
- $\rho$  = 试样密度，单位为  $\text{g}/\text{mm}^3$
- $F$  = 法向力，单位为 N
- $S$  = 滑动距离，单位为 m 9.2 报告平均磨损率保留至小数点后两位。

## 10. Rapport

10.1 Le rapport doit inclure les informations suivantes :

Identification et description du matériel d'essai.

Appliquer la charge, le débit de sable et le nombre de rotations.

Taux d'usure volumétrique moyen et écart type.

Date du test, numéro d'équipement et nom de l'opérateur.

Conditions environnementales (température et humidité) et état d'étalonnage.

## 11. Précision et biais

11.1 Précision — La répétabilité au sein d'un même laboratoire est généralement de  $\pm 5\%$  du taux d'usure moyen ; la reproductibilité entre les laboratoires est d'environ  $\pm 10\%$ . 11.2 Biais — Il n'existe pas de norme absolue pour le biais, mais les résultats doivent concorder avec le matériau de référence à moins de  $10\%$ .

## 12. Mots-clés

12.1 Usure ; sable sec ; roue en caoutchouc ; usure abrasive ; matériau métallique ; résistance à l'usure

## 13. Annexe

Annexe A1. Spécifications abrasives recommandées

A1.1 Fournir des informations détaillées sur la distribution granulométrique du sable de silice et les exigences de pureté pour garantir la cohérence des tests.

Annexe A2. Procédure d'essai des échantillons de revêtement

A2.1 Lignes directrices pour les essais de matériaux de revêtement, y compris les recommandations de réglage de la charge.

## 14. Notes de bas de page

14.1 La présente norme est publiée sous la désignation fixe G65. Le numéro suivant immédiatement la désignation indique l'année de l'adoption initiale ou de la dernière révision, et le numéro entre parenthèses indique l'année de la dernière réaffirmation. L'exposant epsilon ( $\epsilon$ ) indique une

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

modification rédactionnelle depuis la dernière révision ou réaffirmation.

15. Approbation

Approuvé le 1er juillet 2023 par le Comité international ASTM G02 sur l'usure et l'érosion.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## CTIA GROUP LTD

### 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

#### Core Advantages

**30 years of experience:** We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

**Precision customization:** Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

**Quality cost:** Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

#### Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

#### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

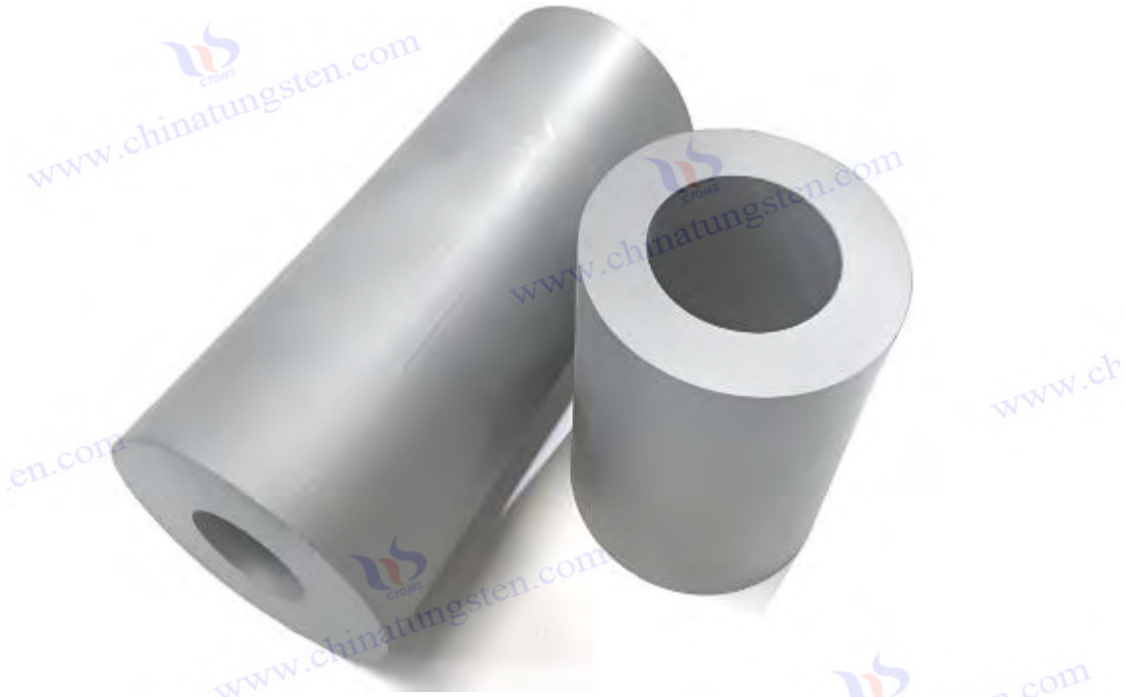
**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)



## moules en carbure cimenté ?

Le carbure cimenté (avec un système carbure de tungstène-cobalt, WC-Co, comme noyau) présente une dureté élevée ( $HV\ 1800-2000 \pm 30$ ), une excellente résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,05\ mm^3 / N \cdot m \pm 0,01\ mm^3 / N \cdot m$ ), une résistance aux températures élevées ( $> 800\ ^\circ C \pm 20\ ^\circ C$ ) et une résistance à la corrosion (taux de corrosion  $< 0,01\ mm/an \pm 0,001\ mm/an$ ), ce qui en fait un matériau idéal pour la fabrication de moules hautes performances. Les moules en carbure cimenté sont fabriqués par des procédés de métallurgie des poudres (tels que le frittage, le pressage isostatique à chaud HIP) ou des technologies de fabrication additive (telles que la fusion laser sélective SLM) et sont largement utilisés dans les scénarios industriels qui nécessitent une haute précision, une longue durée de vie et des géométries complexes. Ce qui suit fournit une discussion plus spécifique et détaillée d'un point de vue professionnel sur les types de moules et les domaines d'application, et ajoute du contenu dans le domaine des véhicules à énergie nouvelle.

### 1. Types de matrices en carbure

Les moules en carbure cimenté sont classés en différents types selon leurs fonctions, leurs structures, leurs objets de traitement et leurs proportions de matériaux. Chaque type est optimisé grâce à des procédés de précision et des traitements de surface pour répondre à des besoins industriels spécifiques. Voici une description des types d'expansion spécialisée :

#### Les matrices d'emboutissage en carbure

sont principalement utilisées pour le poinçonnage, le pliage, l'emboutissage et le bordage de tôles.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les ratios courants sont WC-6 % Co (faible teneur en cobalt et dureté élevée) ou WC-10 % Co (haute ténacité).

#### **Fonctionnalités professionnelles :**

Plage de dureté HV 1800-1900  $\pm$  30, ténacité aux chocs 10-15 MPa·m<sup>1/2</sup>  $\pm$  1 MPa·m<sup>1/2</sup>, adapté à l'emboutissage à grande vitesse (fréquence > 100 fois/min  $\pm$  10 fois/min, charge > 500 kN  $\pm$  50 kN).

La rugosité de surface Ra < 0,1  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m a été obtenue par polissage mécano-chimique (CMP, pression 5-10 kPa  $\pm$  0,5 kPa) et la précision de coupe était < 0,01 mm  $\pm$  0,001 mm.

Résistance à l'usure < 0,05 mm<sup>3</sup> / N·m  $\pm$  0,01 mm<sup>3</sup> / N·m, durée de vie > 10<sup>6</sup> fois  $\pm$  10<sup>4</sup> fois, convient aux plaques d'acier à haute résistance (résistance à la traction > 1000 MPa  $\pm$  100 MPa).

#### **Procédé de fabrication :**

Le pressage isostatique à chaud (HIP, 1300°C  $\pm$  10°C, 200 MPa  $\pm$  5 MPa) a été utilisé pour assurer la compacité (porosité < 0,1%  $\pm$  0,01%, micro-défauts < 0,05  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m).

TiN (épaisseur 5-15  $\mu$ m  $\pm$  0,1  $\mu$ m, dureté HV 2000  $\pm$  50) appliqué par dépôt physique en phase vapeur (PVD, 400-600°C  $\pm$  10°C) réduit le coefficient de frottement (< 0,2  $\pm$  0,05).

par électroérosion (EDM, courant 5-20 A  $\pm$  1 A, précision < 0,01 mm  $\pm$  0,001 mm) pour la réalisation de contours complexes de poinçons et de matrices.

#### **Les filières d'étirage en carbure**

sont utilisées pour l'étirage à froid, l'emboutissage profond ou le filage de fils, tubes ou plaques métalliques. Elles sont couramment utilisées en WC-8%Co ou WC-6%Co-Ni (2%  $\pm$  0,5%).

#### **Fonctionnalités professionnelles :**

Résistance à l'usure < 0,05 mm<sup>3</sup> / N·m  $\pm$  0,01 mm<sup>3</sup> / N·m, finition du trou intérieur Ra < 0,05  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m, contrainte d'arrachement du support > 2000 MPa  $\pm$  100 MPa (comme un fil en acier inoxydable ou un tube en cuivre).

La tolérance de précision géométrique est < 0,01 mm  $\pm$  0,001 mm, l'erreur d'angle du cône est < 0,5°  $\pm$  0,1°, adaptée au tréfilage fin (diamètre 0,1-5 mm  $\pm$  0,05 mm).

Stabilité thermique < 600 °C  $\pm$  20 °C, coefficient de dilatation thermique < 6  $\times$  10<sup>-6</sup> / °C  $\pm$  0,5  $\times$  10<sup>-6</sup> / °C, réduisant la déformation thermique.

#### **Procédé de fabrication :**

Meulage de précision (granulométrie #1200-2000  $\pm$  100, précision < 0,005 mm  $\pm$  0,001 mm) combiné au polissage par ultrasons pour contrôler les microfissures de surface (< 0,01  $\mu$ m  $\pm$  0,001  $\mu$ m).

TiC (épaisseur 5-10  $\mu$ m  $\pm$  0,1  $\mu$ m, force de liaison > 50 MPa  $\pm$  5 MPa) ont été appliqués par dépôt chimique en phase vapeur (CVD, 800-1000°C  $\pm$  10°C, concentration de vapeur 10-20 vol%  $\pm$  1 vol%).

Le traitement de surface au laser (puissance 200-300 W  $\pm$  10 W) optimise la couche durcie dans le trou intérieur (profondeur 0,05-0,1 mm  $\pm$  0,01 mm).

#### **Les matrices de frappe à froid en carbure**

sont utilisées pour le forgeage à froid de boulons, d'écrous, de rivets ou de fixations, avec des compositions telles que WC-10%Co ou WC-15%Co-TiC (5%  $\pm$  0,5%).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### **Fonctionnalités professionnelles :**

Résistance à la compression  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , résistance à la fatigue  $> 10^6 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ , adapté aux déformations élevées ( $> 50 \% \pm 5 \%$ ) et aux charges d'impact transitoires ( $> 1000 \text{ kN} \pm 100 \text{ kN}$ ).

Dureté superficielle HV 1900-2000  $\pm 30$ , résistance à l'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , précision de la cavité  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

Stabilité thermique  $< 500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , contrainte résiduelle  $< 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ , empêche la fissuration à froid.

#### **Procédé de fabrication :**

d' étincelles (SPS,  $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) a assuré une granulométrie de  $0,5\text{-}1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ .

Le durcissement superficiel (puissance laser  $300\text{-}500 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$ , profondeur  $0,1\text{-}0,2 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) combiné au dopage VC ( $0,1\%\text{-}0,5\% \pm 0,01\%$ ) améliore la résistance aux fissures.

Un pressage isostatique à chaud post-traitement (HIP,  $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $150 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) a été utilisé pour éliminer les contraintes internes.

#### **Les matrices de forgeage à chaud en carbure cémenté**

sont utilisées pour le forgeage à chaud de métaux à haute température (tels que l'acier, l'alliage de titane, les alliages à base de nickel), avec une formulation telle que WC-10%Co-TiC ( $5\% \pm 0,5\%$ ) ou WC-12%Co-TaC ( $2\% \pm 0,1\%$ ).

#### **Fonctionnalités professionnelles :**

Résistance à l'oxydation à haute température, perte de masse  $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$  à  $800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , durée de vie du cycle de résistance à la fatigue thermique  $> 5000 \text{ fois} \pm 500 \text{ fois}$ .

Conductivité thermique  $> 120 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$ , coefficient de dilatation thermique  $< 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , adapté au forgeage à  $900\text{-}1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Résistance à la compression  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , résistance aux fissures thermiques de la cavité (taux de croissance des fissures  $< 0,001 \text{ mm/cycle} \pm 0,0001 \text{ mm/cycle}$ ).

#### **Procédé de fabrication :**

HIP ( $1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) avec ajout de TaC ( $0,5\%\text{-}2\% \pm 0,1\%$ ) pour améliorer la résistance à la fissuration à chaud, porosité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ .

La surface est pulvérisée avec du ZrN ( $5\text{-}15 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ , taux de dépôt  $0,1\text{-}0,5 \text{ } \mu\text{m} / \text{min} \pm 0,05 \text{ } \mu\text{m} / \text{min}$ ) ou de l' $\text{Al}_2\text{O}_3$  (anti-oxydation, épaisseur  $10\text{-}20 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,2 \text{ } \mu\text{m}$ ).

Le recuit par traitement thermique ( $900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ,  $2\text{-}4 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$ ) a optimisé l'homogénéité des tissus.

#### **Les matrices de pressage de poudre en carbure cémenté**

sont utilisées pour le pressage de produits issus de la métallurgie des poudres, tels que les engrenages, les roulements ou les matériaux magnétiques. Les matrices couramment utilisées sont le WC-6 % Co-Ni ( $2 \% \pm 0,5 \%$ ) ou le WC-8 % Co-Cr ( $3 \% \pm 0,5 \%$ ).

#### **Fonctionnalités professionnelles :**

Capacité de charge à haute pression  $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , résistance à l'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , complexité de la cavité supportant une profondeur de  $10 \text{ à } 50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ .

Taux de compression  $> 2:1 \pm 0,1$ , uniformité de remplissage de poudre  $> 95 \% \pm 2 \%$ , précision de

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

pressage  $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ .

Stabilité thermique  $< 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ , résistance à la corrosion des poudres ( $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ).

**Procédé de fabrication :**

de précision (granulométrie  $\#1500-3000 \pm 100$ ) combinée à un revêtement TiAlN pulvérisé au plasma (épaisseur  $5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , dureté  $\text{HV } 2800 \pm 50$ ).

Microstructure optimisée HIP ( $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $150 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) avec une granulométrie de  $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

La texturation laser de surface (profondeur  $5-10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ ) améliore la fluidité de la poudre et les propriétés de démoulage.

**Les moules en plastique en carbure**

sont utilisés pour le moulage par injection de thermoplastiques (tels que l'ABS, le PC) ou de plastiques thermodurcissables (tels que la résine époxy), avec une formule telle que WC-8%Co-Cr ( $2\% \pm 0,5\%$ ) ou WC-10%Co-Ni ( $3\% \pm 0,5\%$ ).

**Fonctionnalités professionnelles :**

Résistance à la chaleur  $> 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , résistance à la corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$  (résistance à la corrosion par additifs plastiques), état de surface  $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ .

Résistant au moulage par injection haute pression ( $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ), précision de la cavité  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , adapté à la conception de canaux d'écoulement complexes (longueur  $50-200 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ).

Le coefficient de dilatation thermique est  $< 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , réduisant la déformation du cycle thermique ( $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ).

**Procédé de fabrication :**

La cavité du moule a été réalisée par usinage par électroérosion (EDM, courant  $10-30 \text{ A} \pm 1 \text{ A}$ , précision  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ).

Le revêtement PVD de CrN ( $5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , dureté  $\text{HV } 2000 \pm 50$ ) réduit l'adhérence du plastique et est combiné avec le polissage ( $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ).

Le traitement thermique et le revenu ( $400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $1-2 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$ ) éliminent les contraintes internes.

**Les filières d'extrusion en carbure**

sont utilisées pour l'extrusion continue de métaux ou de plastiques, tels que des profilés en aluminium ou des bandes d'étanchéité en caoutchouc, avec une formulation telle que WC-10%Co-VC ( $0,5\% \pm 0,1\%$ ).

**Fonctionnalités professionnelles :**

Résistance à l'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , résistance à la déformation par extrusion  $> 2000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , précision de la matrice  $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ .

Convient pour l'extrusion longue distance ( $> 10 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$ ), vitesse d'extrusion  $1-5 \text{ m/min} \pm 0,1 \text{ m/min}$ , stabilité de température  $< 500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ .

Coefficient de frottement  $< 0,1 \pm 0,01$ , adhérence réduite du matériau (force d'adhérence  $< 0,5 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$ ).

**Procédé de fabrication :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le broyage de précision et le HIP ( $1300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) assurent une homogénéité interne avec une porosité de  $<0,1\% \pm 0,01\%$ .

Le revêtement de surface  $\text{MoS}_2$  ( $1-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , taux de dépôt  $0,2-0,5 \mu\text{m}/\text{min} \pm 0,05 \mu\text{m}/\text{min}$ ) réduit la friction.

Le traitement de surface au laser (puissance  $200-400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ ) optimise la couche de durcissement (profondeur  $0,1-0,2 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ).

### Les matrices de coupe en carbure

sont utilisées pour la coupe de précision de tôles métalliques ou de tôles minces, avec une formulation telle que  $\text{WC-6\%Co-TiC}$  ( $3\% \pm 0,5\%$ ).

#### Fonctionnalités professionnelles :

Tranchant de coupe : force de coupe  $< 0,5 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$ , durée de vie  $> 10^5 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$ , douceur du tranchant  $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Précision  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , ténacité aux chocs  $10-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , convient au découpage de tôles minces (épaisseur  $0,05-1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ).

Stabilité thermique  $< 400^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ , zone affectée thermiquement réduite ( $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ).

#### Procédé de fabrication :

Découpe laser (puissance  $200-300 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ , précision  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) combinée à un revêtement PVD  $\text{ZrN}$  ( $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ).

Le polissage mécano-chimique (CMP, pression  $5-10 \text{ kPa} \pm 0,5 \text{ kPa}$ ) optimise le tranchant avec une rugosité de  $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Le revenu à basse température ( $300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ,  $1 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$ ) stabilise la structure.

### Les moules de moulage sous pression en carbure cémenté

sont utilisés pour le moulage sous pression de métaux non ferreux (tels que les alliages de zinc et de magnésium), avec une formulation telle que  $\text{WC-12\%Co-TaC}$  ( $2\% \pm 0,1\%$ ).

#### Fonctionnalités professionnelles :

Résistance à la fatigue thermique  $> 4000 \text{ fois} \pm 400 \text{ fois}$ , résistance à la corrosion du métal en fusion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , résistance à la pression de la cavité du moule  $> 1500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ .

Conductivité thermique  $> 100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , coefficient de dilatation thermique  $< 6 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$ , adapté au moulage sous pression à  $600-800^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ .

La précision de la cavité du moule est  $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$  et la rugosité de surface est  $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ .

#### Procédé de fabrication :

HIP ( $1350^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) en combinaison avec un revêtement multicouche de  $\text{TiAlN} + \text{Al}_2\text{O}_3$  (épaisseur  $10-20 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , dureté  $\text{HV } 3000 \pm 50$ ).

par électroérosion (EDM, précision  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) est utilisé pour réaliser des cavités de moules complexes, suivi d'un post-traitement et d'un polissage.

Le recuit de traitement thermique ( $700^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ ,  $2-3 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$ ) réduit les contraintes résiduelles.

### Les matrices de laminage en carbure

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sont utilisées pour le profilage de tôles ou de barres métalliques avec une formulation telle que WC-10%Co-Cr ( $3\% \pm 0,5\%$ ).

**Fonctionnalités professionnelles :**

Résistance à l'usure par roulement  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , résistance à la fatigue  $> 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois, tolérance d'épaisseur de précision de roulement  $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ .

Résistance à la compression  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , stabilité thermique  $< 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ , vitesse de laminage  $1-10 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$ .

Dureté superficielle HV 1900-2000  $\pm 30$ , texture de roulement réduite (hauteur  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ).

**Procédé de fabrication :**

Après forgeage, un HIP ( $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) a été réalisé pour optimiser la taille des grains ( $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ).

Durcissement superficiel (puissance laser  $400-600 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$ , profondeur  $0,2-0,3 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ).

Le TiN revêtu de PVD ( $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) améliore la durabilité.

**2. Domaines d'application des moules en carbure cimenté**

Grâce à leurs excellentes propriétés physiques et chimiques, les moules en carbure cimenté présentent un vaste potentiel d'application dans de nombreux secteurs industriels. Voici les domaines d'application en pleine expansion, notamment celui des véhicules à énergies nouvelles :

**fabrication automobile**

**Applications :** Les matrices d'emboutissage en carbure sont utilisées pour le découpage de panneaux de carrosserie (épaisseur  $0,5-3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ), les matrices de frappe à froid pour boulons et écrous (diamètre  $5-20 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ ), les matrices de forgeage à chaud pour vilebrequins, bielles et engrenages (poids  $1-10 \text{ kg} \pm 0,5 \text{ kg}$ ), les matrices de coulée sous pression pour blocs-cylindres et carters de boîte de vitesses (volume  $0,5-5 \text{ L} \pm 0,1 \text{ L}$ ), les matrices de laminage pour le formage de tôles d'acier (épaisseur  $1-5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ).

**Avantages :** Efficacité de production améliorée ( $> 20\% \pm 2\%$ ), durée de vie du moule prolongée jusqu'à  $10^6$  fois  $\pm 10^4$  Il réduit le nombre de courses et les coûts de maintenance ( $< 5\% \pm 1\%$ ), et prend en charge le traitement de l'acier à haute résistance ( $> 1500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ).

**Industrie aérospatiale**

**Applications :** Les matrices de forgeage à chaud en carbure sont utilisées pour former des lames et des pièces structurales en alliage de titane (température  $900-1100^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ), des matrices d'étrépage pour le traitement de tubes en alliage d'aluminium à haute résistance et de structures en nid d'abeille (diamètre  $10-50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ), des matrices d'extrusion pour la fabrication de fixations aéronautiques (longueur  $20-100 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ ) et des matrices de moulage sous pression pour la production de pièces de fuselage en alliage de magnésium (poids  $0,5-2 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$ ).

**Avantages :** Résistance à la fatigue à haute température ( $> 5000$  fois  $\pm 500$  fois), haute précision (tolérance  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), légèreté (densité  $< 2,7 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) et résistance à l'oxydation à haute température ( $< 0,01\% \pm 0,001\%$ ).

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

### Industrie électronique

**Applications :** Les matrices de pressage en poudre de carbure sont utilisées pour presser des noyaux de micromoteurs (épaisseur  $0,2-0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ ), des moules en plastique pour la fabrication de boîtiers et de connecteurs de téléphones portables (taille  $100-150 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ), des matrices de découpe pour le traitement de circuits imprimés (épaisseur  $0,1-0,3 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) et des matrices d'extrusion pour former des fils (diamètre  $0,05-1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ).

**Avantages :** Moulage de haute précision ( $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), excellente qualité de surface ( $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ ), cycle de production court ( $<1 \text{ h/pièce} \pm 0,1 \text{ h}$ ) et utilisation à haute fréquence ( $>10^4 \text{ fois} \pm 10^3 \text{ fois}$ ).

### Industrie de fabrication mécanique et de moulage

**Applications :** Matrices d'étirage en carbure pour le tréfilage (diamètre  $0,1-5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ ), matrices d'emboutissage pour le traitement des engrenages et des roulements (profondeur de cavité  $10-30 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ), matrices de frappe à froid pour arbres de précision (diamètre  $2-10 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ), matrices de laminage pour barres d'acier (diamètre  $5-20 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ ), matrices de coulée sous pression pour pièces moulées complexes (poids  $0,1-5 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$ ).

**Avantages :** Durée de vie plus longue ( $>10^6 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$  de longueur de tirage), fréquence de changement réduite ( $>50\% \pm 5\%$ ), meilleure régularité de production (écart  $<1\% \pm 0,1\%$ ), prise en charge des matériaux à haute dureté ( $>\text{HRC } 50 \pm 2$ ).

### Fabrication de dispositifs médicaux

**Applications :** Les moules en plastique en carbure sont utilisés pour former des seringues et des cathéters médicaux (épaisseur de paroi  $0,1-0,3 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ), des moules de frappe à froid pour la fabrication de vis orthopédiques et de clous intramédullaires (diamètre  $2-6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ), des moules de coupe pour le traitement des lames chirurgicales (épaisseur  $0,05-0,1 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ ), des moules d'extrusion pour former des cathéters (diamètre intérieur  $0,5-2 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ ), des moules de compression de poudre pour la fabrication de composants articulaires artificiels (poids  $0,1-0,5 \text{ kg} \pm 0,05 \text{ kg}$ ).

**Avantages :** Revêtement biocompatible (ex : Ag, taux antibactérien  $>90\% \pm 2\%$ ), haute précision ( $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), répond aux exigences de stérilité (charge bactérienne  $<10 \text{ UFC/cm}^2 \pm 1 \text{ UFC/cm}^2$ ), durée de vie  $>10^5 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ .

### Énergie et industrie lourde

**Applications :** Les matrices de forgeage à chaud en carbure sont utilisées pour les connecteurs de pales d'éoliennes (diamètre  $> 500 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ ), les matrices de pressage de poudre pour les pièces résistantes à l'usure (telles que les corps de pompe, poids  $5-20 \text{ kg} \pm 1 \text{ kg}$ ), les matrices d'extrusion pour les tiges de forage pétrolier (diamètre  $50-100 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ ), les matrices de moulage sous pression pour les corps de vannes nucléaires (poids  $10-50 \text{ kg} \pm 2 \text{ kg}$ ) et les matrices de laminage pour le traitement des rails (largeur  $100-150 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ ).

**Avantages :** Résistance à l'oxydation à haute température ( $<0,01\% \pm 0,001\%$  à  $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ), résistance à la compression ( $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ), durée de vie prolongée ( $>10^4 \text{ h} \pm 10^3 \text{ h}$ ), support aux environnements extrêmes (pression  $>200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Fabrication de biens de consommation

**Application :** Les moules en plastique en carbure sont utilisés pour les boîtiers d'appareils électroménagers (tels que les boîtiers de télévision, taille 500-1000 mm  $\pm$  10 mm) et le moulage d'ustensiles de cuisine (épaisseur 0,5-2 mm  $\pm$  0,1 mm), les moules de découpe pour le traitement de pièces décoratives en métal (épaisseur 0,1-0,5 mm  $\pm$  0,01 mm), les moules d'extrusion pour la fabrication de profilés de portes et fenêtres en alliage d'aluminium (longueur 3-6 m  $\pm$  0,1 m).

**Avantages :** Finition de surface élevée ( $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ ), efficacité de production élevée ( $> 50 \text{ pièces/h} \pm 5 \text{ pièces/h}$ ) et faible taux de reprise ( $< 2 \% \pm 0,5 \%$ ).

### Bâtiments et infrastructures

**Applications :** Matrices de laminage en carbure pour le formage de barres d'acier (diamètre 6-40 mm  $\pm$  0,5 mm), matrices de pressage de poudre pour la fabrication d'éléments de moules en béton préfabriqué (poids 10-30 kg  $\pm$  1 kg), matrices d'extrusion pour le traitement de cadres de fenêtres en aluminium (longueur 1-3 m  $\pm$  0,05 m), matrices de moulage sous pression pour la production de quincaillerie de construction (poids 0,5-2 kg  $\pm$  0,1 kg).

**Avantages :** Durée de vie ( $> 10^6 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$ ), haute précision ( $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ ), support de production à grande échelle ( $> 1000 \text{ pièces/jour} \pm 100 \text{ pièces}$ ).

### Défense et industrie militaire

**Applications :** Les matrices de forgeage à chaud en carbure sont utilisées pour former des plaques de blindage de chars (épaisseur 10-50 mm  $\pm$  1 mm), des matrices de frappe à froid pour la fabrication de douilles d'obus (diamètre 20-100 mm  $\pm$  2 mm), des matrices d'emboutissage pour le traitement des douilles de missiles (longueur 0,5-2 m  $\pm$  0,05 m) et des matrices de moulage sous pression pour la production de composants radar (poids 1-5 kg  $\pm$  0,2 kg).

**Avantages :** Résistance à la fatigue à haute température ( $> 10^4 \text{ fois} \pm 10^3 \text{ fois}$ ), résistance aux chocs ( $> 500 \text{ J/cm}^2 \pm 50 \text{ J/cm}^2$ ), répondant aux normes militaires (MIL-STD-810).

### Application dans le domaine des véhicules à énergie nouvelle

Avec le développement rapide de l'industrie des véhicules à énergie nouvelle (NEV), les moules en carbure cémenté jouent un rôle irremplaçable dans la fabrication de composants clés des véhicules électriques.

#### Matrices d'emboutissage en carbure

Utilisé pour le poinçonnage et le formage de boîtiers de batterie (épaisseur 0,8-2 mm  $\pm$  0,1 mm, tels que les boîtiers de batterie au lithium fer phosphate ou au lithium ternaire) et de pièces structurelles de carrosserie (telles que les plaques de protection du châssis, taille 1000-2000 mm  $\pm$  10 mm), charge de poinçonnage  $> 1000 \text{ kN} \pm 100 \text{ kN}$ .

#### Matrices de frappe à froid en carbure

Fabriquer des connecteurs haute tension (5-15 mm  $\pm$  0,2 mm de diamètre) et des arbres de rotor de moteur (10-30 mm  $\pm$  0,5 mm de diamètre), supporter des fixations haute résistance ( $> 1500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) et un taux de déformation  $> 40 \% \pm 5 \%$ .

#### Matrice de forgeage à chaud en carbure

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Utilisé pour le formage à chaud des collecteurs de courant de batterie d'alimentation (tels que feuille de cuivre/aluminium, épaisseur  $0,1-0,2 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) et des boîtiers de stator de moteur (poids  $5-15 \text{ kg} \pm 0,5 \text{ kg}$ ), température de traitement  $600-900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ , charge  $>2000 \text{ kN} \pm 200 \text{ kN}$ .

#### Filière d'extrusion en carbure

Traitement de cadres de batterie en alliage d'aluminium (section  $50-100 \text{ mm}^2 \pm 2 \text{ mm}^2$ ) et de tubes de dissipation thermique (longueur  $1-3 \text{ m} \pm 0,05 \text{ m}$ ), vitesse d'extrusion  $0,5-2 \text{ m/min} \pm 0,1 \text{ m/min}$ , pression  $>1500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ .

#### Moule de moulage sous pression en carbure

Fabrication de carters de moteurs (poids  $10-30 \text{ kg} \pm 1 \text{ kg}$ ) et de carters de pieux de chargement (dimensions  $300-500 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ), résistance à la pression  $>1200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , température de coulée  $650-750^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ .

#### Matrices de coupe en carbure

Utilisé pour la découpe de précision des pièces polaires de batterie (épaisseur  $0,08-0,15 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ ) et le poinçonnage des bornes du faisceau de câbles (longueur  $10-50 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ ), force de coupe  $< 0,5 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$ , précision  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

#### Avantages des matrices d'emboutissage en carbure

**Haute précision et cohérence** : précision du moule  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , garantissant la tolérance d'assemblage du module de batterie ( $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ), améliorant la densité énergétique ( $> 160 \text{ Wh/kg} \pm 10 \text{ Wh/kg}$ ) et la cohérence des cellules de batterie  $> 98 \% \pm 1 \%$ .

**Résistance à l'usure et longue durée de vie** : durée de vie du moule  $> 10^6$  fois  $\pm 10^4$  Il réduit la fréquence de remplacement ( $> 60 \% \pm 5 \%$ ), réduit les coûts de production ( $< 10 \% \pm 1 \%$ ) et prend en charge une production continue de  $> 500 \text{ h} \pm 50 \text{ h}$ .

**Résistance aux hautes températures et à la corrosion** : les matrices de forgeage à chaud résistent aux environnements à  $900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ , à la corrosion électrolytique ( $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , comme une solution de sel de lithium pH 7-9) et à une durée de vie prolongée ( $> 10^4 \text{ h} \pm 10^3 \text{ h}$ ).

**Support léger** : Combinant un alliage d'aluminium haute résistance ( $> 300 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ ) et un alliage de magnésium ( $> 200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ) moulé, il peut réduire le poids de  $10$  à  $15 \% \pm 2 \%$ , augmenter l'autonomie de conduite ( $> 500 \text{ km} \pm 20 \text{ km}$ ) et répondre aux normes NEDC.

**Production efficace** : Efficacité d'emboutissage et de moulage sous pression  $> 50$  pièces/h  $\pm 5$  pièces/h, raccourcissement du cycle de production des pièces de véhicules à énergie nouvelle ( $< 2 \text{ h/pièce} \pm 0,1 \text{ h}$ ), prise en charge de la production de masse à grande échelle ( $> 10^4$  véhicules/an  $\pm 10^3$  véhicules).

#### Défis techniques et solutions :

**Défis** : Les boîtiers de batteries haute tension sont sujets aux microfissures (longueur  $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) lors de l'emboutissage, les contraintes thermiques ( $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ ) lors du forgeage à chaud provoquent des déformations et les moules de moulage sous pression sont facilement corrodés par le métal en fusion (taux d'érosion  $< 0,02 \text{ mm/an} \pm 0,002 \text{ mm/an}$ ).

**Solution** : Optimiser le revêtement PVD TiAlN (épaisseur  $10-20 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , dureté HV  $3200 \pm 50$ ) de la matrice d'emboutissage pour améliorer la résistance aux fissures, introduire un substrat préchauffé ( $200-400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) pour réduire les contraintes thermiques et post-traiter le HIP

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1300°C ± 10°C, 200 MPa ± 5 MPa) pour améliorer la structure interne. Ajouter du TaC (2% ± 0,1%) au moule de coulée sous pression pour améliorer la résistance à la corrosion, combiné à un revêtement Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (épaisseur 15-25 µm ± 0,2 µm) pour ralentir l'érosion.

**Tendance de développement** : Avec le développement de la technologie des batteries à semi-conducteurs et des piles à combustible à hydrogène, les moules en carbure cimenté doivent encore améliorer leur résistance aux hautes températures (> 1000 °C ± 50 °C) et leur résistance à la corrosion électrochimique (< 0,005 mm/an ± 0,001 mm/an), et explorer la technologie d'impression 3D (SLM, épaisseur de couche 20-50 µm ± 1 µm) pour fabriquer des moules de cadre de batterie complexes, prenant en charge la conception de gradient multi-matériaux (gradient de dureté 1800-2200 HV ± 50).

### 3. Orientation future du développement des moules en carbure cimenté

**Optimisation des matériaux** : Développer des formulations à faible teneur en cobalt (par exemple WC-Ni-Cr, Co < 5% ± 0,5%) ou des nanocomposites (taille des particules WC < 100 nm ± 10 nm) pour améliorer la ténacité et la biocompatibilité.

**Innovation procédé** : Introduction de la technologie d'impression 3D (SLM, épaisseur de couche 20-50 µm ± 1 µm) pour fabriquer des moules complexes, combinée à un post-traitement HIP (1300°C ± 10°C) pour réduire la porosité (< 0,1% ± 0,01%).

**Intelligent** : des capteurs intégrés surveillent la contrainte du moule (< 50 MPa ± 5 MPa) et la température (< 600°C ± 10°C) pour une maintenance prédictive.

**Durabilité** : Utilisation de poudre de carbure recyclée (taux de réutilisation > 90% ± 2%) et procédé à faible consommation énergétique (consommation énergétique < 10 kWh/kg ± 1 kWh/kg).

L'utilisation des moules en carbure cimenté dans l'industrie continue de se développer, et leurs hautes performances répondent aux besoins de nombreux secteurs, de l'automobile à la défense nationale en passant par les véhicules à énergies nouvelles. La croissance rapide de ces véhicules a notamment favorisé le développement de la technologie des moules vers une fabrication de haute précision, à haut rendement et respectueuse de l'environnement. D'autres avancées technologiques sont attendues dans les 5 à 10 prochaines années.

### 4. Normes pertinentes pour les moules en carbure cimenté

#### Normes industrielles communes

##### Conditions techniques et normes

La fabrication et l'utilisation des matrices en carbure cimenté sont généralement conformes aux « Conditions techniques relatives aux matrices d'étirage en carbure cimenté » (n° d'enregistrement : 8261-2001), gérées par le Bureau national de l'industrie mécanique. Cette norme spécifie les propriétés des matériaux, la précision dimensionnelle, la résistance à l'usure et la durée de vie de la matrice d'étirage, et s'applique à la fabrication et au contrôle des matrices de tréfilage.

##### Exigences de performance des matériaux

Les moules en carbure doivent répondre aux exigences de dureté élevée (HV 1800-2000 ± 30), de résistance à l'usure élevée (taux d'usure < 0,05 mm<sup>3</sup> / N · m ± 0,01 mm<sup>3</sup> / N · m) et de ténacité élevée

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(ténacité à la rupture  $10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ), qui sont largement adoptées dans l'industrie.

### Normes nationales ou internationales

La production de moules en carbure cimenté fait souvent référence à la norme « **GB/T 5242-2006 Conditions techniques générales pour le carbure cimenté** », qui couvre la composition, les tests de performance et les exigences de contrôle qualité des matériaux en carbure cimenté et convient à la sélection des matières premières dans la fabrication de moules.

**Normes ISO** : Les normes ISO, telles que l'ISO 513 (classification des matériaux des outils de coupe) et l'ISO 28080 (test de propriétés des matériaux durs), peuvent être utilisées comme référence pour la conception de moules en carbure, notamment dans les projets d'exportation ou de coopération internationale.

### Normes d'application de l'industrie

#### Norme de matrice d'emboutissage

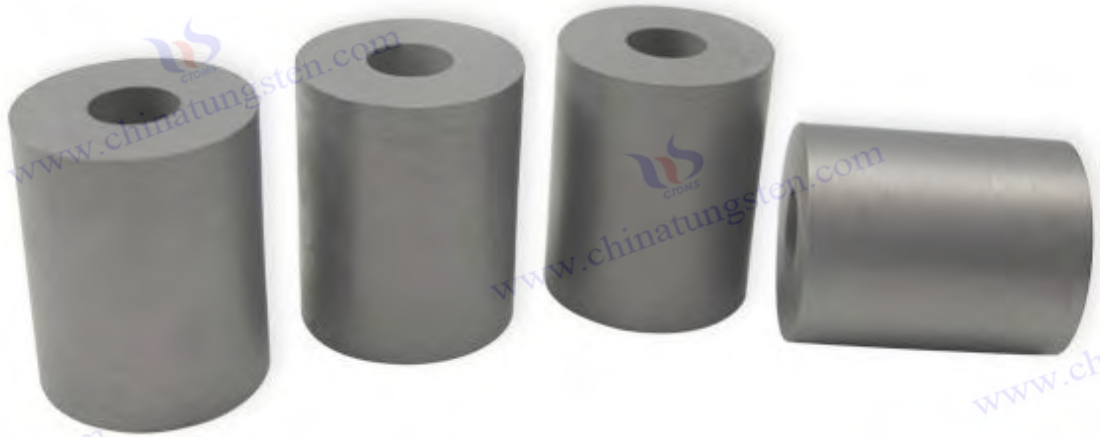
Pour les matrices d'emboutissage en carbure cimenté, l'industrie se réfère souvent à la norme « **JB/T 8144-2010 Conditions techniques pour les matrices d'emboutissage** », qui spécifie la conception structurelle, le processus de traitement thermique et les exigences de traitement de surface de la matrice pour garantir une haute précision (tolérance  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) et une longue durée de vie ( $> 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois l'impulsion).

#### Norme de matrice pour la métallurgie des poudres

Les moules en carbure cimenté dans le domaine de la métallurgie des poudres peuvent suivre les « **Conditions techniques YB/T 5136-2006 pour les moules de métallurgie des poudres** », en mettant l'accent sur la précision de la cavité du moule ( $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ ) et la résistance à la pression ( $> 3\,000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ).



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## JB/T 8144-2010 Exigences techniques pour les matrices d'emboutissage

### 1. Champ d'application

Cette norme spécifie les conditions techniques des matrices d'emboutissage, notamment le choix des matériaux, les exigences de conception, le procédé de fabrication, les performances techniques, les méthodes d'inspection, le marquage, l'emballage, le transport et le stockage. Elle s'applique aux matrices d'emboutissage à froid pour diverses plaques métalliques (telles que les plaques d'acier, d'aluminium et d'acier inoxydable) et matériaux non métalliques (tels que les plastiques et le caoutchouc), y compris les matrices mono-processus, composites et multi-processus. Elle est largement utilisée dans les secteurs de l'automobile, de l'électronique, de l'aérospatiale et d'autres industries.

### 2. Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour tous les documents référencés avec date, les modifications ou révisions ultérieures (hors errata) ne s'appliquent pas à la présente norme. Il est toutefois recommandé d'adopter la nouvelle version du document en fonction des résultats de la recherche.

GB/T 5242-2006 Spécifications générales pour le carbure cimenté

GB/T 6110-2021 Matrices d'emboutissage - Types et dimensions des matrices d'emboutissage en carbure cimenté

《Spécifications techniques de la matrice d'emboutissage en carbure cimenté JB/T 3943-2017》

GB/T 1804-2000 Tolérances et ajustements - Écarts limites et écarts fondamentaux des dimensions linéaires

### 3. Termes et définitions

Matrice d'emboutissage : outil utilisé pour donner à un matériau la forme souhaitée par pression, comprenant une matrice, un poinçon et un guide.

Durée de vie de l'emboutissage : capacité du moule à maintenir des performances stables sous un nombre spécifié de temps d'emboutissage.

Précision d'assemblage : tolérance d'ajustement et précision de position relative entre les différents

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

composants du moule.

#### 4. Exigences matérielles

##### 4.1 Matériau du moule

Matériau en carbure cémenté : système WC-Co (tel que WC-6%Co, WC-10%Co), dureté HV 1800-2000  $\pm$  30, résistance à la compression  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ .

Acier : Acier Cr12MoV, D2 ou H13, dureté HRC 58-62  $\pm$  2, trempé et revenu.

Pièces non fonctionnelles : Fabriquées en acier 45# ou en acier Q235, dureté HRC 30-40  $\pm$  2 après traitement thermique.

##### 4.2 Exigences de performance

Résistance à l'usure : taux d'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , testé selon GB/T 12444.

Résistance à la chaleur : température de fonctionnement  $< 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ , coefficient de dilatation thermique  $< 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .

Résistance à la fatigue : Durée de vie en fatigue  $> 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois, test selon GB/T 3075.

##### 4.3 Traitement de surface

Revêtement optionnel : TiN, Revêtement TiC ou CrN, épaisseur 5-15  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , dureté HV 2000-3000  $\pm 50$ , force de liaison  $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ , utilisant le procédé PVD ou CVD.

#### 5. Exigences techniques

##### 5.1 Exigences de conception

Type de structure : comprenant des matrices à processus unique, composées et progressives, conçues selon la norme GB/T 6397.

Niveau de tolérance : La tolérance dimensionnelle linéaire est conforme à la norme GB/T 1804 IT6-IT8, tolérance géométrique de circularité  $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

Précision de guidage : L'écart entre la colonne de guidage et le manchon de guidage est de 0,005 à 0,01  $\text{mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

##### 5.2 Taille et précision

du moule : Selon les exigences du dessin de la pièce, le diamètre extérieur maximal est  $\leq 500 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  et la hauteur est  $\leq 300 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ .

Tolérance de la pièce de travail : jeu de poinçonnage 0,01-0,05  $\text{mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ , ajusté en fonction de l'épaisseur de la tôle.

Précision d'assemblage : erreur de position relative  $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ .

##### 5.3 Qualité de surface

La rugosité de la surface de travail  $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ , en utilisant un processus de meulage ou de polissage de précision.

Il n'y a pas de fissures, de pores ou de rayures sur la surface et la taille maximale des défauts est  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

##### 5.4 Indicateurs de performance

Durée de vie au poinçonnage :  $> 500\,000$  fois  $\pm 10^4$  fois (selon le matériau et les conditions de poinçonnage), usure  $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ .

Précision d'emboutissage : tolérance de taille de pièce  $\pm 0,05 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ , rugosité de surface  $R_a < 0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6. Processus de fabrication

### 6.1 Préparation des matières premières

Poudre de carbure cimenté : granulométrie WC  $0,5-2\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$  , erreur de teneur en Co  $\pm 0,5\%$  ,  
mélangée par broyeur à boulets (vitesse  $200-300\ \text{tr/min} \pm 10\ \text{tr/min}$ , temps  $24-48\ \text{h} \pm 1\ \text{h}$ ).

Prétraitement de l'acier : Recuit pour éliminer les contraintes internes, dureté HRC  $20-25 \pm 2$ .

### 6.2 Procédé de moulage

Carbure cimenté : Pressage isostatique à froid (CIP,  $200\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$ ) ou moulage par injection,  
densité du corps vert  $> 60\% \pm 2\%$  densité théorique.

Acier : forgé ou moulé, rapport de forgeage  $\geq 4:1$ .

### 6.3 Frittage et traitement thermique

Carbure cimenté : pressage isostatique à chaud (HIP,  $1300-1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $200\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$ ),  
porosité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ .

Acier : trempe ( $1000-1050^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , refroidissement à l'huile) + revenu ( $200-250^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $2-3\ \text{h} \pm 0,1\ \text{h}$ ), dureté HRC  $58-62 \pm 2$ .

### 6.4 Finition

Les pièces de travail sont produites par usinage par électroérosion (EDM, courant  $5-20\ \text{A} \pm 1\ \text{A}$ )  
avec une précision de  $< 0,01\ \text{mm} \pm 0,001\ \text{mm}$ .

Meulage de précision (granulométrie  $\#1200-3000 \pm 100$ ) ou polissage par ultrasons, contrôle de la  
rugosité de surface  $R_a < 0,2\ \mu\text{m} \pm 0,02\ \mu\text{m}$ .

### 6.5 Assemblage

Le guide est monté à la presse, avec un jeu de  $0,005-0,01\ \text{mm} \pm 0,001\ \text{mm}$  et un couple de serrage  
des boulons de  $50-100\ \text{N}\cdot\text{m} \pm 5\ \text{N}\cdot\text{m}$ .

## 7. Méthodes d'inspection

### 7.1 Dimensions et précision

La tolérance est conforme à la norme GB/T 1182 IT6-IT8 lorsqu'elle est inspectée par une machine  
à mesurer tridimensionnelle (MMT).

### 7.2 Propriétés des matériaux

Le test de dureté est conforme à la norme GB/T 231.1, le test de résistance à la compression est  
conforme à la norme GB/T 3852 et le test de résistance à l'usure est conforme à la norme GB/T  
12444.

La conductivité thermique est conforme à la norme ASTM E1461 et le coefficient de dilatation  
thermique est conforme à la norme ISO 17864.

### 7.3 Qualité de surface

Les défauts ont été vérifiés par microscopie optique (grossissement  $500\times \pm 50\times$ ) ou microscopie  
électronique à balayage (MEB), avec une taille maximale de défaut  $< 0,01\ \text{mm} \pm 0,001\ \text{mm}$ .

### 7.4 Durée de vie de l'emboutissage

Le test a été réalisé sur une poinçonneuse standard utilisant des matériaux standard (par exemple  
une plaque d'acier SPCC de  $1\ \text{mm}$  d'épaisseur, une vitesse de poinçonnage de  $20\ \text{à}\ 50\ \text{fois/min} \pm 2\ \text{fois/min}$ ), et le nombre de poinçons a été enregistré jusqu'à ce que l'usure atteigne  $0,1\ \text{mm} \pm 0,01\ \text{mm}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 8. Conditions d'essai

Température de l'environnement de test :  $20-25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , humidité  $50\%-70\% \pm 5\%$ .

Charge de poinçonnage :  $500-2000 \text{ kN} \pm 50 \text{ kN}$ , ajustée selon les spécifications du moule.

## 9. Étiquetage, emballage, transport et stockage

### 9.1 Logo

La plaque signalétique sur la surface du moule indique : le numéro du moule, la spécification (diamètre extérieur  $\times$  hauteur en mm), le tonnage d'emboutissage, la date de fabrication, le nom du fabricant et la hauteur des caractères est de  $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ .

### 9.2 Emballage

Utilisez de la mousse antichoc et du papier antirouille pour emballer, placez-les dans des boîtes en bois ou en métal et marquez « Manipuler avec précaution » et « Résistant à l'humidité » à l'intérieur de la boîte.

### 9.3 Transport

Évitez les fortes vibrations et les températures élevées ( $> 50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ). Le véhicule de transport doit être équipé de dispositifs amortisseurs.

### 9.4 Stockage

Conserver dans un endroit sec et aéré, à une température comprise entre  $0$  et  $40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  et une humidité  $< 60\% \pm 5\%$ . Éviter tout contact avec des substances acides ou alcalines.

## 10. Utilisation et entretien

### 10.1 Conditions d'utilisation

Préchauffer le moule à  $50-100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  avant l'emboutissage pour réduire les chocs thermiques.

Utiliser une huile d'emboutissage conforme à la norme GB/T 7326, avec une viscosité de  $20$  à  $50 \text{ cSt} \pm 5 \text{ cSt}$ .

### 10.2 Entretien

Vérifiez régulièrement l'usure de la surface de travail, tous les  $10^4 \pm 10^3$  coups de poing.

Si l'usure est supérieure à  $0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ , polissez-la ou remplacez-la à temps.

### 10.3 Normes de mise au rebut

Lorsque l'usure de la surface de travail est  $> 0,2 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$  ou que la longueur de la fissure est  $> 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ , elle est considérée comme de la ferraille.

## 11. Assurance qualité

Le taux d'échantillonnage de chaque lot de moules est  $\geq 5\% \pm 1\%$ , et le taux qualifié est  $> 95\% \pm 2\%$ .

Fournir des certificats de matériaux et des rapports d'inspection, y compris des données de test de performance et des enregistrements d'inspection dimensionnelle.

## 12. Annexe (informative)

Référence des paramètres du processus d'emboutissage

Vitesse de poinçonnage :  $20$  à  $100$  fois/min  $\pm 2$  fois/min.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

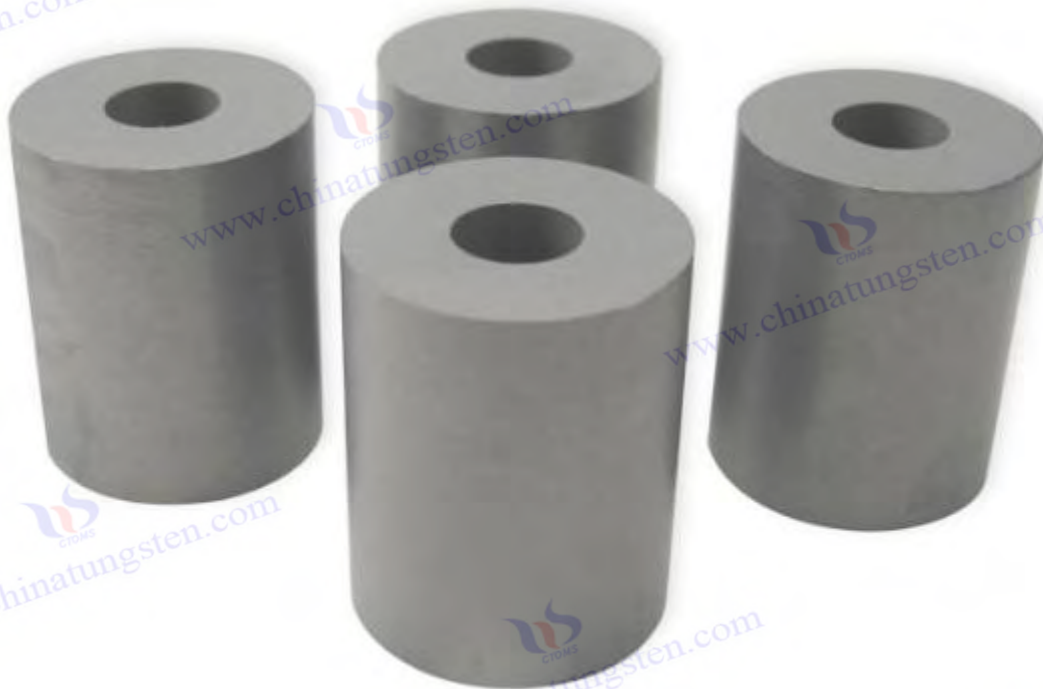
Espace de masquage : lorsque l'épaisseur de la plaque est de 0,5 à 2 mm, l'espace est de 0,01 à 0,05 mm  $\pm$  0,005 mm.

Défauts typiques et solutions

Fissure : ajustez la température du traitement thermique ou augmentez la vitesse de refroidissement par trempe.

Déformation : optimisez la conception du moule et augmentez la précision du guidage.

Cette condition technique reflète pleinement les exigences fondamentales de la norme « JB/T 8144-2010 », combine les caractéristiques du carbure cémenté et d'autres matériaux et garantit les performances des matrices d'emboutissage en termes de haute précision, de durée de vie élevée et de fiabilité élevée.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## Matrices d'emboutissage en carbure

### Conditions techniques

Un cahier des charges complet, exhaustif et détaillé des « Conditions techniques pour les matrices d'étirage en carbure » a été élaboré à partir des normes en vigueur (telles que la norme JB/T 3943-2017 « Conditions techniques pour les matrices d'étirage en carbure » et les spécifications sectorielles associées) et des pratiques du secteur. Ce cahier des charges vise à normaliser le choix des matériaux, le procédé de fabrication, les exigences de performance, les méthodes d'inspection et les exigences de maintenance des matrices d'étirage en carbure afin de garantir leur haute performance et leur fiabilité lors du tréfilage.

#### 1. Champ d'application

Cette condition technique s'applique à la fabrication, à l'inspection et à l'utilisation des filières d'étirage en carbure cimenté, couvrant les filières d'étirage utilisées pour l'étirage à froid de fils métalliques (tels que les fils d'acier, les fils de cuivre, les fils d'acier inoxydable, etc.), et s'applique aux filières d'étirage d'une plage de diamètre de 0,1 mm à 20 mm  $\pm$  0,05 mm.

#### 2. Références normatives

Les clauses des documents suivants deviennent les clauses de la présente condition technique par référence à celle-ci. Pour tous les documents référencés avec dates, les modifications ou révisions ultérieures (hors errata) ne s'appliquent pas à la présente condition technique. Il est toutefois recommandé d'adopter la nouvelle version du document en fonction des résultats de la recherche.

GB/T 5242-2006 Spécifications générales pour le carbure cimenté

《Spécifications techniques de la matrice d'emboutissage en carbure cimenté JB/T 3943-2017》

GB/T 6110-2021 Matrices d'emboutissage - Types et dimensions des matrices d'emboutissage en carbure cimenté

#### 3. Termes et définitions

Filière d'étirage : Filière annulaire ou conique en carbure utilisée pour réduire le diamètre du fil métallique par le processus d'étirage.

Angle du cône de travail : L'angle de la partie conique du trou intérieur du moule, qui affecte la force de traction et la qualité de la surface.

Durée de vie : Capacité d'une matrice à maintenir des performances stables dans une longueur d'étirage ou un nombre de fois spécifié.

#### 4. Exigences matérielles

##### 4.1 Composition du matériau

La matrice du moule adopte le système carbure de tungstène-cobalt (WC-Co), et le rapport recommandé est WC-6%Co, WC-8%Co ou WC-10%Co, et l'erreur de teneur en cobalt est de  $\pm 0,5\%$ . Selon les caractéristiques du matériau étiré (par exemple, acier à haute teneur en carbone ou alliage de cuivre), une légère quantité de phases de renforcement telles que TiC ( $0,5\%-2\% \pm 0,1\%$ ) ou TaC ( $0,5\%-1\% \pm 0,1\%$ ) peut être ajoutée pour améliorer la résistance à l'usure et la résistance à la chaleur.

##### 4.2 Propriétés physiques

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Dureté : HV 1800-2000  $\pm$  30. La méthode d'essai est conforme à la norme GB/T 3850.

Densité : 14,5-15,0 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,2 g/cm<sup>3</sup> , méthode d'essai selon GB/T 3851.

Résistance à la compression : > 4000 MPa  $\pm$  100 MPa, méthode d'essai selon GB/T 3852.

Ténacité à la rupture : 10-15 MPa·m<sup>1/2</sup>  $\pm$  1 MPa·m<sup>1/2</sup> , méthode d'essai selon GB/T 21068.

#### 4.3 Stabilité chimique

Résistance à la corrosion : Immersé dans une solution de NaCl à 0,9 % pendant 24 h  $\pm$  1 h, taux de corrosion < 0,01 mm/an  $\pm$  0,001 mm/an.

Résistance à l'oxydation : perte de masse < 0,01 %  $\pm$  0,001 % à 800 °C  $\pm$  20 °C.

### 5. Exigences techniques

#### 5.1 Dimensions et tolérances

du moule : 10-50 mm  $\pm$  0,1 mm, hauteur : 5-30 mm  $\pm$  0,1 mm.

Diamètre du trou de travail : 0,1-20 mm  $\pm$  0,01 mm, angle du cône : 6°-15°  $\pm$  0,5°, conformément aux types et dimensions spécifiés dans GB/T 6110-2021.

Tolérances géométriques : circularité < 0,005 mm  $\pm$  0,001 mm, cylindricité < 0,01 mm  $\pm$  0,001 mm.

#### 5.2 Qualité de surface

La rugosité de la surface de travail Ra < 0,1  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m est obtenue par meulage de précision ou par polissage mécano-chimique (CMP).

Il n'y a pas de fissures, de pores ou d'inclusions sur la surface et la taille maximale des défauts est < 0,01 mm  $\pm$  0,001 mm.

#### 5.3 Exigences de performance

Durée de vie : Longueur d'étirage > 10<sup>6</sup> m  $\pm$  10<sup>4</sup> m (selon le matériau étiré), taux d'usure < 0,05 mm<sup>3</sup> / N·m  $\pm$  0,01 mm<sup>3</sup> / N·m .

Stabilité thermique : température de fonctionnement < 600°C  $\pm$  20°C, coefficient de dilatation thermique < 6 $\times$ 10<sup>-6</sup> /°C  $\pm$  0,5 $\times$ 10<sup>-6</sup> /°C.

Précision de tréfilage : tolérance de diamètre de fil  $\leq$   $\pm$  0,01 mm  $\pm$  0,001 mm, rugosité de surface Ra < 0,4  $\mu$ m  $\pm$  0,05  $\mu$ m .

#### 5.4 Revêtement (facultatif)

TiN , Les revêtements TiC ou CrN peuvent être appliqués par dépôt physique en phase vapeur (PVD) ou par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) avec une épaisseur de 5 à 15  $\mu$ m  $\pm$  0,1  $\mu$ m , une dureté de HV 2000-3000  $\pm$  50 et une force de liaison de > 50 MPa  $\pm$  5 MPa.

### 6. Processus de fabrication

#### 6.1 Préparation des matières premières

De la poudre de WC de haute pureté (taille des particules 0,5-2  $\mu$ m  $\pm$  0,1  $\mu$ m ) et de la poudre de Co ont été utilisées, et l'uniformité du mélange était > 95 %  $\pm$  2 % , ce qui a été obtenu par broyage à boulets (vitesse 200-300 tr/min  $\pm$  10 tr/min, temps 24-48 h  $\pm$  1 h).

#### 6.2 Procédé de moulage

Le pressage isostatique à froid (CIP, 200 MPa  $\pm$  5 MPa) ou le moulage par injection est utilisé, et la densité du corps vert est > 60 %  $\pm$  2 % de la densité théorique.

#### 6.3 Procédé de frittage

Pressage isostatique à chaud (HIP, 1300-1400°C  $\pm$  10°C, 200 MPa  $\pm$  5 MPa) ou frittage assisté par

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

champ (SPS,  $1350^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) pour assurer une porosité de  $<0,1\% \pm 0,01\%$  et une granulométrie de  $0,5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

#### 6.4 Finition

Le trou intérieur a été réalisé par usinage par électroérosion (EDM, courant  $5\text{-}20 \text{ A} \pm 1 \text{ A}$ ) avec une précision de  $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

Meulage de précision (granulométrie  $\#1200\text{-}3000 \pm 100$ ) ou polissage par ultrasons, contrôle de la rugosité de surface  $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

#### 6.5 Traitement thermique

Le recuit ( $400\text{-}600^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ,  $2\text{-}4 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$ ) élimine les contraintes internes et la contrainte résiduelle est  $<100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ .

### 7. Méthodes d'inspection

#### 7.1 Précision dimensionnelle et géométrique

La tolérance est conforme au niveau IT6 spécifié dans la norme GB/T 1182 lorsqu'elle est testée à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).

#### 7.2 Propriétés des matériaux

Le test de dureté est conforme à la norme GB/T 3850, la densité est conforme à la norme GB/T 3851 et la résistance à la compression est conforme à la norme GB/T 3852.

La ténacité à la rupture est conforme à la norme GB/T 21068 et la conductivité thermique est conforme à la norme ASTM E1461.

#### 7.3 Qualité de surface

Les défauts ont été vérifiés à l'aide d'un microscope optique (grossissement  $500\times \pm 50\times$ ) ou d'un microscope électronique à balayage (MEB), la taille maximale des défauts étant  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

#### 7.4 Durée de vie

Testez sur une machine à étirer standard, en utilisant des matériaux d'étirage standard (par exemple, un fil d'acier de 1 mm de diamètre, une vitesse d'étirage de  $1 \text{ à } 5 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$ ), et enregistrez la longueur d'étirage jusqu'à ce que l'usure atteigne  $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ .

### 8. Conditions d'essai

Température de l'environnement de test :  $20\text{-}25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , humidité  $50\%\text{-}70\% \pm 5\%$ .

Charge d'essai d'arrachement :  $500\text{-}2000 \text{ N} \pm 50 \text{ N}$ , ajustée selon les spécifications du moule.

### 9. Étiquetage, emballage, transport et stockage

#### 9.1 Logo

La plaque signalétique sur la surface du moule indique : le numéro du moule, les spécifications (diamètre  $\times$  hauteur en mm), la date de fabrication et le nom du fabricant. La hauteur des caractères, de  $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , est clairement visible.

#### 9.2 Emballage

Utilisez de la mousse antichoc et du papier anticorrosion pour emballer, placez-les dans des boîtes en bois ou en plastique et marquez « Manipuler avec précaution » à l'intérieur de la boîte.

#### 9.3 Transport

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Évitez les fortes vibrations et les températures élevées ( $> 50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Le véhicule de transport doit être équipé de dispositifs amortisseurs.

#### 9.4 Stockage

Conserver dans un endroit sec et aéré, à une température comprise entre  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  et une humidité  $< 60\% \pm 5\%$ . Éviter tout contact avec des substances acides ou alcalines.

### 10. Utilisation et entretien

#### 10.1 Conditions d'utilisation

Préchauffer la matrice à  $50\text{-}100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  avant l'étirage pour réduire les chocs thermiques.

Le lubrifiant d'étirage utilisé est une huile d'étirage conforme à la norme GB/T 7326 et ayant une viscosité de  $20\text{ à }50\text{ cSt} \pm 5\text{ cSt}$ .

#### 10.2 Entretien

Vérifiez régulièrement l'usure du trou de travail, tous les  $10^5\text{ m} \pm 10^4\text{ m}$  de longueur de tirage.

Si l'usure est supérieure à  $0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ , polissez-la ou remplacez-la à temps.

#### 10.3 Normes de mise au rebut

Lorsque le diamètre du trou de travail augmente de  $> 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$  ou que la longueur de la fissure de surface est  $> 0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ , il sera considéré comme un rebut.

### 11. Assurance qualité

Le taux d'échantillonnage de chaque lot de moules est  $\geq 5\% \pm 1\%$ , et le taux qualifié est  $> 95\% \pm 2\%$ .

Fournir des certificats de matériaux et des rapports d'inspection, y compris des données de test de performance et des enregistrements d'inspection dimensionnelle.

### 12. Annexe (informative)

Référence des paramètres du processus de dessin

Vitesse de traction :  $1\text{-}10\text{ m/s} \pm 0,1\text{ m/s}$ .

Taux de réduction :  $10\%\text{-}25\% \pm 2\%$ , selon le matériau.

Défauts typiques et solutions

Fissures : ajuster la température de frittage ou augmenter la pression HIP. Porosité : optimiser le mélange des poudres ou améliorer la densité de frittage.

Cette condition technique intègre les normes actuelles (telles que JB/T 3943-2017) et les pratiques de l'industrie pour garantir que les matrices d'étirage en carbure cémenté présentent une fiabilité et une cohérence élevées en termes de performances, de fabrication et d'utilisation.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## YB/T 5136-2006

### Exigences techniques pour les moules de métallurgie des poudres

#### 1. Champ d'application

Cette norme spécifie les conditions techniques des moules pour la métallurgie des poudres, notamment le choix des matériaux, les exigences de conception, le procédé de fabrication, les performances techniques, les méthodes d'inspection, le marquage, l'emballage, le transport et le stockage. Elle s'applique aux moules utilisés dans les procédés de pressage par métallurgie des poudres, notamment les moules en carbure ou en acier pour le pressage d'engrenages, de roulements, de matériaux magnétiques et d'autres produits. Elle est largement utilisée dans les secteurs de l'automobile, de l'électronique, de la fabrication de machines, etc.

#### 2. Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour tous les documents référencés avec date, les modifications ou révisions ultérieures (hors errata) ne s'appliquent pas à la présente norme. Il est toutefois recommandé d'adopter la nouvelle version du document en fonction des résultats de la recherche.

GB/T 5242-2006 Spécifications générales pour le carbure cimenté

GB/T 6110-2021 Matrices d'emboutissage - Types et dimensions des matrices d'emboutissage en carbure cimenté

《Spécifications techniques de la matrice d'emboutissage en carbure cimenté JB/T 3943-2017》

GB/T 1804-2000 Tolérances et ajustements - Écarts limites et écarts fondamentaux des dimensions linéaires

#### 3. Termes et définitions

Moule de métallurgie des poudres : outil utilisé pour façonner de la poudre métallique ou de la poudre composite par pressage à haute pression, comprenant un moule supérieur, un moule inférieur et un manchon de moule.

Durée de vie du pressage : Capacité d'un moule à maintenir des performances stables sous un nombre spécifié de cycles de pressage.

Uniformité du remplissage : La consistance de la distribution de la poudre dans la cavité du moule affecte directement la densité du produit.

#### 4. Exigences matérielles

##### 4.1 Matériau du moule

Matériau en carbure cimenté : système WC-Co (tel que WC-6%Co, WC-8%Co ou WC-10%Co), dureté HV 1800-2000  $\pm$  30, résistance à la compression > 4000 MPa  $\pm$  100 MPa.

Acier : Acier Cr12MoV, D2 ou H13, dureté HRC 58-62  $\pm$  2, trempé et revenu.

Pièces non fonctionnelles : Fabriquées en acier 40Cr ou 45#, dureté HRC 30-40  $\pm$  2 après traitement thermique.

##### 4.2 Exigences de performance

Résistance à l'usure : taux d'usure < 0,05 mm<sup>3</sup> / N · m  $\pm$  0,01 mm<sup>3</sup> / N · m, testé selon GB/T 12444.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Résistance à la pression : Pression maximale  $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , testée selon GB/T 3852.

Résistance à la fatigue : Durée de vie en fatigue  $> 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois, test selon GB/T 3075.

#### 4.3 Traitement de surface

Revêtement optionnel : TiN , Revêtement TiC ou  $\text{Al}_2\text{O}_3$  , épaisseur  $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  , dureté HV 2000-3000  $\pm 50$ , force de liaison  $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ , utilisant le procédé PVD ou CVD.

### 5. Exigences techniques

#### 5.1 Exigences de conception

Type structurel : comprenant un moule de pressage unidirectionnel, un moule de pressage bidirectionnel et un moule multi-empreses, conçu selon la norme GB/T 6406.

Niveau de tolérance : La tolérance dimensionnelle linéaire est conforme à la norme GB/T 1804 IT6-IT8, le parallélisme de tolérance géométrique est  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

de guidage : L'écart entre la colonne de guidage et le manchon de guidage est de  $0,005$  à  $0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

#### 5.2 Taille et précision

du moule : Selon les exigences du dessin de la pièce, le diamètre extérieur maximal est  $\leq 400 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  et la hauteur est  $\leq 250 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ .

Dimensions de la cavité : Tolérance  $\pm 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ , profondeur  $10-50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ .

Précision d'assemblage : erreur de position relative  $< 0,03 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ .

#### 5.3 Qualité de surface

La rugosité de la surface de travail  $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$  , en utilisant un processus de meulage ou de polissage de précision.

Il n'y a pas de fissures, de pores ou d'inclusions sur la surface et la taille maximale des défauts est  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

#### 5.4 Indicateurs de performance

Durée de vie de pressage :  $> 500\,000$  fois  $\pm 10^4$  fois (selon le matériau de la poudre et la pression), usure  $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ .

Précision de pressage : tolérance de densité du produit  $\pm 2\% \pm 0,5\%$ , tolérance de taille  $\pm 0,05 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ .

Uniformité de remplissage :  $> 95\% \pm 2\%$ , testé selon YB/T 5120.

### 6. Processus de fabrication

#### 6.1 Préparation des matières premières

Poudre de carbure cimenté : granulométrie WC  $0,5-2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  , erreur de teneur en Co  $\pm 0,5\%$  , mélangée par broyeur à boulets (vitesse  $200-300 \text{ tr/min} \pm 10 \text{ tr/min}$ , temps  $24-48 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ ).

Prétraitement de l'acier : Recuit pour éliminer les contraintes internes, dureté HRC  $20-25 \pm 2$ .

#### 6.2 Procédé de moulage

Carbure cimenté : Pressage isostatique à froid (CIP,  $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) ou moulage par injection, densité du corps vert  $> 60\% \pm 2\%$  densité théorique.

Acier : forgé ou moulé, rapport de forgeage  $\geq 4:1$ .

#### 6.3 Frittage et traitement thermique

Carbure cimenté : pressage isostatique à chaud (HIP,  $1300-1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ),

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

porosité  $<0,1\% \pm 0,01\%$ .

Acier : trempe ( $1000-1050^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , refroidissement à l'huile) + revenu ( $200-250^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , 2-3 h  $\pm 0,1$  h), dureté HRC  $58-62 \pm 2$ .

#### 6.4 Finition

La cavité du moule a été réalisée par usinage par électroérosion (EDM, courant  $5-20\text{ A} \pm 1\text{ A}$ ) avec une précision de  $<0,02\text{ mm} \pm 0,002\text{ mm}$ .

Meulage de précision (granulométrie  $\#1200-3000 \pm 100$ ) ou polissage par ultrasons, contrôle de la rugosité de surface  $R_a <0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,02\text{ }\mu\text{m}$ .

#### 6.5 Assemblage

Le guide est monté à la presse, avec un jeu de  $0,005-0,015\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$  et un couple de serrage des boulons de  $50-80\text{ N}\cdot\text{m} \pm 5\text{ N}\cdot\text{m}$ .

### 7. Méthodes d'inspection

#### 7.1 Dimensions et précision

La tolérance est conforme à la norme GB/T 1182 IT6-IT8 lorsqu'elle est inspectée par une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).

#### 7.2 Propriétés des matériaux

Le test de dureté est conforme à la norme GB/T 231.1, le test de résistance à la compression est conforme à la norme GB/T 3852 et le test de résistance à l'usure est conforme à la norme GB/T 12444.

La conductivité thermique est conforme à la norme ASTM E1461 et le coefficient de dilatation thermique est conforme à la norme ISO 17864.

#### 7.3 Qualité de surface

Les défauts ont été vérifiés par microscopie optique (grossissement  $500\times \pm 50\times$ ) ou microscopie électronique à balayage (MEB), avec une taille maximale de défaut  $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ .

#### 7.4 Durée de vie du pressage

Le test a été réalisé sur une presse de métallurgie des poudres standard utilisant de la poudre de fer standard (par exemple ASC 100.29, pression  $500-1000\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ ) et le nombre de presses a été enregistré jusqu'à ce que l'usure atteigne  $0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ .

### 8. Conditions d'essai

Température de l'environnement de test :  $20-25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , humidité  $50\%-70\% \pm 5\%$ .

Charge de pressage :  $500-2000\text{ kN} \pm 50\text{ kN}$ , ajustée selon les spécifications du moule.

### 9. Étiquetage, emballage, transport et stockage

#### 9.1 Logo

La plaque signalétique sur la surface du moule indique : le numéro du moule, la spécification (diamètre extérieur  $\times$  hauteur en mm), le tonnage de pressage, la date de fabrication, le nom du fabricant et la hauteur des caractères est de  $3\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ .

#### 9.2 Emballage

Utilisez de la mousse antichoc et du papier antirouille pour emballer, placez-les dans des boîtes en bois ou en métal et marquez « Manipuler avec précaution » et « Résistant à l'humidité » à l'intérieur

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

de la boîte.

### 9.3 Transport

Évitez les fortes vibrations et les températures élevées ( $> 50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Le véhicule de transport doit être équipé de dispositifs amortisseurs.

### 9.4 Stockage

Conserver dans un endroit sec et aéré, à une température comprise entre  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  et une humidité  $< 60\% \pm 5\%$ . Éviter tout contact avec des substances acides ou alcalines.

## 10. Utilisation et entretien

### 10.1 Conditions d'utilisation

Préchauffer le moule à  $50\text{--}100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  avant de presser pour réduire les chocs thermiques.

Utiliser une huile de pressage conforme à la norme GB/T 7326, avec une viscosité de  $20\text{ à }50\text{ cSt} \pm 5\text{ cSt}$ .

### 10.2 Entretien

Vérifiez régulièrement l'usure de la cavité de l'outil, tous les  $10^4 \pm 10^3$  pressages.

Si l'usure est supérieure à  $0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ , polissez-la ou remplacez-la à temps.

### 10.3 Normes de mise au rebut

Lorsque l'usure de la cavité est  $> 0,2\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$  ou que la longueur de la fissure est  $> 0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ , elle est considérée comme un rebut.

## 11. Assurance qualité

Le taux d'échantillonnage de chaque lot de moules est  $\geq 5\% \pm 1\%$ , et le taux qualifié est  $> 95\% \pm 2\%$ .

Fournir des certificats de matériaux et des rapports d'inspection, y compris des données de test de performance et des enregistrements d'inspection dimensionnelle.

## 12. Annexe (informative)

Référence des paramètres du processus de pressage

Pression de pressage :  $500\text{--}1000\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ .

Taux de compression :  $2:1\text{ à }4:1 \pm 0,1$ , selon les caractéristiques de la poudre.

Défauts typiques et solutions

Fissure : ajuster la température de frittage ou augmenter la pression HIP.

Densité inégale : Optimisez le processus de remplissage de poudre et augmentez le temps de vibration ( $10\text{--}20\text{ s} \pm 1\text{ s}$ ).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## GB/T 6110-2021

### Matrice de dessin

### Matrices d'emboutissage en carbure

### Type et taille de la structure

#### 1. Champ d'application

Cette norme spécifie la structure, les spécifications dimensionnelles et les exigences techniques des filières d'étirage en carbure cimenté. Elle s'applique aux filières utilisées pour l'étirage à froid de fils métalliques (acier, cuivre, acier inoxydable, etc.), couvrant les filières d'un diamètre compris entre 0,1 mm et 20 mm  $\pm$  0,05 mm. Elle est largement utilisée dans la transformation des métaux, l'électronique, l'automobile et d'autres industries.

#### 2. Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour tous les documents référencés avec date, les modifications ou révisions ultérieures (hors errata) ne s'appliquent pas à la présente norme. Il est toutefois recommandé d'adopter la nouvelle version du document en fonction des résultats de la recherche.

GB/T 5242-2006 Spécifications générales pour le carbure cimenté

《Spécifications techniques de la matrice d'emboutissage en carbure cimenté JB/T 3943-2017》

GB/T 1804-2000 Tolérances et ajustements - Écarts limites et écarts fondamentaux des dimensions linéaires

#### 3. Termes et définitions

Filière d'étirage : Filière annulaire ou conique en carbure utilisée pour réduire le diamètre du fil métallique par le processus d'étirage.

Angle du cône de travail : L'angle de la partie conique du trou intérieur du moule, qui affecte la force de traction et la qualité de la surface.

Zone de guidage : zone à l'intérieur du trou de la matrice utilisée pour guider le fil afin d'assurer la stabilité du dessin.

#### 4. Type structurel

##### 4.1 Structure de base

Les matrices d'emboutissage sont généralement constituées des zones fonctionnelles suivantes :

Zone d'entrée : Guider le fil dans la filière, longueur 0,5-1 mm  $\pm$  0,1 mm, angle du cône 20°-30°  $\pm$  2°.

Zone de lubrification : Fournit un stockage de lubrifiant, longueur 0,5-1,5 mm  $\pm$  0,1 mm, angle du cône 10°-20°  $\pm$  1°.

de travail du cône : zone de déformation d'étirage principale, longueur 0,5-2 mm  $\pm$  0,1 mm, angle du cône 6°-15°  $\pm$  0,5°.

Zone de dimensionnement : Contrôle du diamètre final, longueur 0,2-0,8 mm  $\pm$  0,05 mm, tolérance de diamètre  $\pm$  0,01 mm  $\pm$  0,001 mm.

Zone de sortie : Protéger la surface du fil, longueur 0,2-0,5 mm  $\pm$  0,05 mm, angle du cône 30°-45°

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

$\pm 2^\circ$ .

#### 4.2 Classification

Matrice à trou unique : trou de travail unique, adapté aux petits lots ou aux dessins de spécifications uniques, diamètre maximum  $20\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$ .

Matrice multi-trous : plusieurs trous de travail, adaptés à l'étirage continu, espacement des trous  $\geq 2\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ .

Matrice combinée : conception modulaire, pièces de travail remplaçables, adaptable à diverses spécifications de fils.

### 5. Dimensions

#### 5.1 Dimensions

Diamètre extérieur :  $10\text{--}50\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ , les spécifications recommandées sont 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 40 mm.

Hauteur :  $5\text{--}30\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ , les spécifications recommandées sont 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm.

Épaisseur :  $3\text{--}15\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ , selon le diamètre et l'application.

#### 5.2 Taille du trou intérieur

Ouverture minimale :  $0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ , ouverture maximale  $20\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$ .

Longueur du cône de travail :  $0,5\text{--}2\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ , rapport longueur/ouverture 1:1 à 1:5.

Longueur de la zone de dimensionnement :  $0,2\text{--}0,8\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$ , rapport longueur/ouverture 1:2 à 1:10.

#### 5.3 Tolérances et ajustements

Tolérance dimensionnelle linéaire : Selon la norme GB/T 1804 IT6-IT8, tolérance d'ouverture  $\pm 0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ .

Tolérances géométriques : circularité  $< 0,005\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ , cylindricité  $< 0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ .

Tolérance d'angle du cône :  $\pm 0,5^\circ \pm 0,1^\circ$ .

#### 5.4 Spécifications spéciales

Micro moule (ouverture  $\leq 0,5\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ ) : longueur de la zone de dimensionnement  $0,1\text{--}0,3\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$ , angle du cône  $8^\circ\text{--}12^\circ \pm 0,5^\circ$ .

Grands moules (ouverture  $> 10\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$ ) : longueur du cône de travail  $1,5\text{--}2\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ , angle du cône  $10^\circ\text{--}15^\circ \pm 0,5^\circ$ .

### 6. Exigences techniques

#### 6.1 Exigences matérielles

Le carbure cémenté WC-Co est utilisé, et le rapport recommandé est WC-6%Co, WC-8%Co ou WC-10%Co, et l'erreur de teneur en cobalt est de  $\pm 0,5\%$ .

Dureté HV  $1800\text{--}2000 \pm 30$ , résistance à la compression  $> 4000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ , porosité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ .

#### 6.2 Qualité de surface

La rugosité de la surface de travail  $Ra < 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ , en utilisant la technologie de meulage de précision ou de polissage mécano-chimique (CMP).

Il n'y a pas de fissures, de pores ou d'inclusions sur la surface et la taille maximale des défauts est  $<$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,01 mm  $\pm$  0,001 mm.

### 6.3 Indicateurs de performance

Durée de vie : Longueur d'arrachement  $> 10^{-6}$  m  $\pm 10^{-4}$  m, taux d'usure  $< 0,05$  mm<sup>3</sup> / N · m  $\pm 0,01$  mm<sup>3</sup> / N · m .

Stabilité thermique : température de fonctionnement  $< 600^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ , coefficient de dilatation thermique  $< 6 \times 10^{-6}$  / $^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}$  / $^{\circ}\text{C}$ .

Précision de tréfilage : tolérance de diamètre de fil  $\leq \pm 0,01$  mm  $\pm 0,001$  mm, rugosité de surface Ra  $< 0,4$   $\mu\text{m} \pm 0,05$   $\mu\text{m}$  .

### 6.4 Revêtement (facultatif)

TiN , Les revêtements TiC ou CrN peuvent être appliqués à l'aide de la technologie PVD ou CVD avec une épaisseur de 5 à 15  $\mu\text{m} \pm 0,1$   $\mu\text{m}$  , une dureté de HV 2000-3000  $\pm 50$  et une force de liaison de  $> 50$  MPa  $\pm 5$  MPa.

## 7. Processus de fabrication

### 7.1 Préparation des matières premières

De la poudre de WC de haute pureté (taille des particules  $0,5-2$   $\mu\text{m} \pm 0,1$   $\mu\text{m}$  ) et de la poudre de Co ont été utilisées, et l'uniformité du mélange était  $> 95\% \pm 2\%$  , ce qui a été obtenu par broyage à boulets (vitesse 200-300 tr/min  $\pm 10$  tr/min, temps 24-48 h  $\pm 1$  h).

### 7.2 Processus de moulage

Pressage isostatique à froid (CIP, 200 MPa  $\pm 5$  MPa) ou moulage par injection, densité du corps vert  $> 60\% \pm 2\%$  densité théorique.

### 7.3 Procédé de frittage

Pressage isostatique à chaud (HIP,  $1300-1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , 200 MPa  $\pm 5$  MPa) ou frittage assisté par champ (SPS,  $1350^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , 50 MPa  $\pm 1$  MPa) pour garantir une granulométrie de  $0,5-1$   $\mu\text{m} \pm 0,01$   $\mu\text{m}$  .

### 7.4 Finition

Le trou intérieur a été réalisé par usinage par électroérosion (EDM, courant 5-20 A  $\pm 1$  A) avec une précision de  $< 0,01$  mm  $\pm 0,001$  mm.

Meulage de précision (granulométrie #1200-3000  $\pm 100$ ) ou polissage par ultrasons, contrôle de la rugosité de surface Ra  $< 0,1$   $\mu\text{m} \pm 0,01$   $\mu\text{m}$  .

## 8. Méthodes d'inspection

### 8.1 Dimensions et précision

La tolérance est conforme à la norme GB/T 1182 IT6-IT8 lorsqu'elle est inspectée par une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).

### 8.2 Propriétés des matériaux

Le test de dureté est conforme à la norme GB/T 3850, la densité est conforme à la norme GB/T 3851 et la résistance à la compression est conforme à la norme GB/T 3852.

La conductivité thermique est conforme à la norme ASTM E1461 et le coefficient de dilatation thermique est conforme à la norme ISO 17864.

### 8.3 Qualité de surface

Les défauts ont été vérifiés par microscopie optique (grossissement  $500\times \pm 50\times$ ) ou microscopie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

électronique à balayage (MEB), avec une taille maximale de défaut  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

#### 8.4 Durée de vie

Testez sur une machine à étirer standard, en utilisant des matériaux d'étirage standard (par exemple, un fil d'acier de 1 mm de diamètre, une vitesse d'étirage de 1 à 5 m/s  $\pm 0,1 \text{ m/s}$ ), et enregistrez la longueur d'étirage jusqu'à ce que l'usure atteigne  $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ .

#### 9. Conditions d'essai

Température de l'environnement de test :  $20\text{-}25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , humidité 50%-70%  $\pm 5\%$ .

Charge d'essai d'arrachement :  $500\text{-}2000 \text{ N} \pm 50 \text{ N}$ , ajustée selon les spécifications du moule.

### 10. Étiquetage, emballage, transport et stockage

#### 10.1 Logo

La plaque signalétique sur la surface du moule indique : le numéro du moule, les spécifications (diamètre  $\times$  hauteur en mm), la date de fabrication et le nom du fabricant. La hauteur des caractères, de  $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , est clairement visible.

#### 10.2 Emballage

Utilisez de la mousse antichoc et du papier anticorrosion pour emballer, placez-les dans des boîtes en bois ou en plastique et marquez « Manipuler avec précaution » à l'intérieur de la boîte.

#### 10.3 Transport

Évitez les fortes vibrations et les températures élevées ( $> 50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ). Le véhicule de transport doit être équipé de dispositifs amortisseurs.

#### 10.4 Stockage

Conserver dans un endroit sec et aéré, à une température comprise entre  $0 \text{ et } 40^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  et une humidité  $< 60\% \pm 5\%$ . Éviter tout contact avec des substances acides ou alcalines.

### 11. Utilisation et entretien

#### 11.1 Conditions d'utilisation

Préchauffer la matrice à  $50\text{-}100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  avant l'étirage pour réduire les chocs thermiques.

Utiliser une huile de tréfilage conforme à la norme GB/T 7326, avec une viscosité de 20 à 50 cSt  $\pm 5 \text{ cSt}$ .

#### 11.2 Entretien

Vérifiez régulièrement l'usure du trou de travail, tous les  $10^5 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$  de longueur de tirage.

Si l'usure est supérieure à  $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ , polissez-la ou remplacez-la à temps.

#### 11.3 Normes de mise au rebut

Lorsque le diamètre du trou de travail augmente de  $> 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$  ou que la longueur de la fissure de surface est  $> 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ , il sera considéré comme un rebut.

### 12. Assurance qualité

Le taux d'échantillonnage de chaque lot de moules est  $\geq 5\% \pm 1\%$ , et le taux qualifié est  $> 95\% \pm 2\%$ .

Fournir des certificats de matériaux et des rapports d'inspection, y compris des données de test de performance et des enregistrements d'inspection dimensionnelle.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 13. Annexe (informative)

Référence des paramètres du processus de dessin

Vitesse de traction :  $1-10 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$ .

Taux de réduction :  $10\%-25\% \pm 2\%$ , selon le matériau.

Défauts typiques et solutions

Fissure : ajuster la température de frittage ou augmenter la pression HIP.

Porosité : Optimiser le mélange de poudre ou améliorer la densité de frittage.



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## JB/T 3943-2017

### Matrice de dessin

### Matrices d'emboutissage en carbure

### Conditions techniques

#### 1. Champ d'application

Cette norme spécifie les conditions techniques relatives au choix des matériaux, au procédé de fabrication, aux performances techniques, aux méthodes de contrôle, au marquage, à l'emballage, au transport et au stockage des filières d'étirage en carbure cimenté. Elle s'applique aux filières utilisées pour l'étirage à froid de fils métalliques (tels que les fils d'acier, de cuivre, d'acier inoxydable, etc.), couvrant les filières d'un diamètre compris entre 0,1 mm et 20 mm  $\pm$  0,05 mm. Elle est largement utilisée dans la transformation des métaux, l'électronique, l'automobile et d'autres industries.

#### 2. Références normatives

Les articles des documents suivants deviennent les articles de la présente norme par référence. Pour tous les documents référencés avec date, les modifications ou révisions ultérieures (hors errata) ne s'appliquent pas à la présente norme. Il est toutefois recommandé d'adopter la nouvelle version du document en fonction des résultats de la recherche.

GB/T 5242-2006 Spécifications générales pour le carbure cimenté

GB/T 6110-2021 Matrices d'emboutissage - Types et dimensions des matrices d'emboutissage en carbure cimenté

GB/T 1804-2000 Tolérances et ajustements - Écarts limites et écarts fondamentaux des dimensions linéaires

#### 3. Termes et définitions

Filière d'étirage : Filière annulaire ou conique en carbure utilisée pour réduire le diamètre du fil métallique par le processus d'étirage.

Angle du cône de travail : L'angle de la partie conique du trou intérieur du moule, qui affecte la force de traction et la qualité de la surface.

Durée de vie : Capacité d'une matrice à maintenir des performances stables dans une longueur ou un nombre de fois d'étirage spécifié.

#### 4. Exigences matérielles

##### 4.1 Composition du matériau

La matrice du moule adopte le système carbure de tungstène-cobalt (WC-Co), et le rapport recommandé est WC-6%Co, WC-8%Co ou WC-10%Co, et l'erreur de teneur en cobalt est de  $\pm 0,5\%$ . Selon les caractéristiques du matériau étiré (par exemple, acier à haute teneur en carbone ou alliage de cuivre), une légère quantité de phases de renforcement telles que TiC (0,5%-2%  $\pm$  0,1%) ou TaC (0,5%-1%  $\pm$  0,1%) peut être ajoutée pour améliorer la résistance à l'usure et la résistance à la chaleur.

##### 4.2 Propriétés physiques

Dureté : HV 1800-2000  $\pm$  30, méthode d'essai selon GB/T 3850.

Densité : 14,5-15,0 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,2 g/cm<sup>3</sup>, méthode d'essai selon GB/T 3851.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Résistance à la compression :  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , méthode d'essai selon GB/T 3852.

Ténacité à la rupture :  $10\text{-}15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , méthode d'essai selon GB/T 21068.

#### 4.3 Stabilité chimique

Résistance à la corrosion : Immersé dans une solution de NaCl à 0,9 % pendant  $24 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ , taux de corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ .

Résistance à l'oxydation : perte de masse  $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$  à  $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ .

### 5. Exigences techniques

#### 5.1 Type structurel

La structure du moule est conforme à la norme GB/T 6110-2021, y compris la zone d'entrée, la zone de lubrification, la zone du cône de travail, la zone de dimensionnement et la zone de sortie.

Angle du cône dans la zone d'entrée :  $20^\circ\text{-}30^\circ \pm 2^\circ$ , longueur  $0,5\text{-}1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ .

Angle du cône de travail :  $6^\circ\text{-}15^\circ \pm 0,5^\circ$ , longueur  $0,5\text{-}2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ .

Longueur de la zone de calibrage :  $0,2\text{-}0,8 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ , tolérance de diamètre  $\pm 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

#### 5.2 Dimensions et tolérances

Diamètre extérieur :  $10\text{-}50 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , les spécifications recommandées sont 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 40 mm.

Hauteur :  $5\text{-}30 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , les spécifications recommandées sont 10 mm, 15 mm, 20 mm et 25 mm.

Diamètre du trou de travail :  $0,1\text{-}20 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ , tolérance selon GB/T 1804 IT6-IT8.

Tolérances géométriques : circularité  $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , cylindricité  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

#### 5.3 Qualité de surface

La rugosité de la surface de travail  $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , en utilisant la technologie de meulage de précision ou de polissage mécano-chimique (CMP).

Il n'y a pas de fissures, de pores ou d'inclusions sur la surface et la taille maximale des défauts est  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

#### 5.4 Exigences de performance

Durée de vie : Longueur d'étirage  $> 10^6 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$  (selon le matériau étiré), taux d'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ .

Stabilité thermique : température de fonctionnement  $< 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ , coefficient de dilatation thermique  $< 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .

Précision de tréfilage : tolérance de diamètre de fil  $< \pm 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , rugosité de surface  $R_a < 0,4 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ .

#### 5.5 Revêtement (facultatif)

TiN, Les revêtements TiC ou CrN peuvent être appliqués par dépôt physique en phase vapeur (PVD) ou par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) avec une épaisseur de  $5 \text{ à } 15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , une dureté de HV 2000-3000  $\pm 50$  et une force de liaison de  $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ .

### 6. Processus de fabrication

#### 6.1 Préparation des matières premières

De la poudre de WC de haute pureté (taille des particules  $0,5\text{-}2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) et de la poudre de Co

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ont été utilisées, et l'uniformité du mélange était  $> 95 \% \pm 2 \%$ , ce qui a été obtenu par broyage à boulets (vitesse 200-300 tr/min  $\pm 10$  tr/min, temps 24-48 h  $\pm 1$  h).

#### 6.2 Procédé de moulage

Pressage isostatique à froid (CIP, 200 MPa  $\pm 5$  MPa) ou moulage par injection, densité du corps vert  $> 60 \% \pm 2 \%$  densité théorique.

#### 6.3 Procédé de frittage

Pressage isostatique à chaud (HIP, 1300-1400°C  $\pm 10^\circ\text{C}$ , 200 MPa  $\pm 5$  MPa) ou frittage assisté par champ (SPS, 1350°C  $\pm 10^\circ\text{C}$ , 50 MPa  $\pm 1$  MPa) pour assurer une porosité de  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$  et une granulométrie de  $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

#### 6.4 Finition

Le trou intérieur a été réalisé par usinage par électroérosion (EDM, courant 5-20 A  $\pm 1$  A) avec une précision de  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

Meulage de précision (granulométrie #1200-3000  $\pm 100$ ) ou polissage par ultrasons, contrôle de la rugosité de surface  $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

#### 6.5 Traitement thermique

Le recuit (400-600°C  $\pm 10^\circ\text{C}$ , 2-4 h  $\pm 0,1$  h) élimine les contraintes internes et la contrainte résiduelle est  $< 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ .

### 7. Méthodes d'inspection

#### 7.1 Précision dimensionnelle et géométrique

La tolérance est conforme à la norme GB/T 1182 IT6-IT8 lorsqu'elle est inspectée par une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).

#### 7.2 Propriétés des matériaux

Le test de dureté est conforme à la norme GB/T 3850, la densité est conforme à la norme GB/T 3851 et la résistance à la compression est conforme à la norme GB/T 3852.

La ténacité à la rupture est conforme à la norme GB/T 21068 et la conductivité thermique est conforme à la norme ASTM E1461.

#### 7.3 Qualité de surface

à l'aide d'un microscope optique (grossissement  $500\times \pm 50\times$ ) ou d'un microscope électronique à balayage (MEB), la taille maximale du défaut étant  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

#### 7.4 Durée de vie

Testez sur une machine à étirer standard, en utilisant des matériaux d'étirage standard (par exemple, un fil d'acier de 1 mm de diamètre, une vitesse d'étirage de 1 à 5 m/s  $\pm 0,1$  m/s), et enregistrez la longueur d'étirage jusqu'à ce que l'usure atteigne  $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ .

### 8. Conditions d'essai

Température de l'environnement de test :  $20-25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , humidité 50%-70%  $\pm 5\%$ .

Charge d'essai d'arrachement :  $500-2000 \text{ N} \pm 50 \text{ N}$ , ajustée selon les spécifications du moule.

### 9. Étiquetage, emballage, transport et stockage

#### 9.1 Logo

La plaque signalétique sur la surface du moule indique : le numéro du moule, les spécifications

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(diamètre × hauteur en mm), la date de fabrication et le nom du fabricant. La hauteur des caractères, de 3 mm ± 0,1 mm, est clairement visible.

## 9.2 Emballage

Utilisez de la mousse antichoc et du papier anticorrosion pour emballer, placez-les dans des boîtes en bois ou en plastique et marquez « Manipuler avec précaution » à l'intérieur de la boîte.

## 9.3 Transport

Évitez les fortes vibrations et les températures élevées ( $> 50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ). Le véhicule de transport doit être équipé de dispositifs amortisseurs.

## 9.4 Stockage

Conserver dans un endroit sec et aéré, à une température comprise entre  $0$  et  $40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  et une humidité  $< 60\% \pm 5\%$ . Éviter tout contact avec des substances acides ou alcalines.

## 10. Utilisation et entretien

### 10.1 Conditions d'utilisation

Préchauffer la matrice à  $50-100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  avant l'étirage pour réduire les chocs thermiques.

Utiliser une huile de tréfilage conforme à la norme GB/T 7326, avec une viscosité de 20 à 50 cSt ± 5 cSt.

### 10.2 Entretien

Vérifiez régulièrement l'usure du trou de travail, tous les  $10^{-5}\text{ m} \pm 10^{-4}\text{ m}$  de longueur de tirage.

Si l'usure est supérieure à  $0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ , polissez-la ou remplacez-la à temps.

### 10.3 Normes de mise au rebut

Lorsque le diamètre du trou de travail augmente de  $> 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$  et que la longueur de la fissure de surface est  $> 0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ , il sera considéré comme mis au rebut.

## 11. Assurance qualité

Le taux d'échantillonnage de chaque lot de moules est  $\geq 5\% \pm 1\%$ , et le taux qualifié est  $> 95\% \pm 2\%$ .

Fournir des certificats de matériaux et des rapports d'inspection, y compris des données de test de performance et des enregistrements d'inspection dimensionnelle.

## 12. Annexe (informative)

Référence des paramètres du processus de dessin

Vitesse d'étirage :  $1-10\text{ m/s} \pm 0,1\text{ m/s}$ . Taux de réduction :  $10\%-25\% \pm 2\%$ , selon le matériau.

Défauts typiques et solutions

Fissure : ajuster la température de frittage ou augmenter la pression HIP.

Porosité : Optimiser le mélange de poudre ou améliorer la densité de frittage.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Quelles sont les caractéristiques et les domaines d'application des substrats de dissipation thermique en carbure cimenté ?

Les substrats de dissipation thermique en carbure cimenté sont basés sur le système carbure de tungstène-cobalt (WC-Co), associé à des matériaux à haute conductivité thermique (tels que le carbure de silicium SiC, le nitrure d'aluminium AlN ou le nitrure de bore BN) et à d'autres phases de renforcement (comme le carbure de titane TiC ou le carbure de tantale TaC). Ils sont préparés par des procédés de métallurgie des poudres (comme le pressage isostatique à chaud (HIP), le frittage ou le frittage assisté par champ (SPS)) ou par des technologies de fabrication additive (comme la fusion sélective par laser (SLM) ou la fusion par faisceau d'électrons (EBM)). Ces substrats allient la dureté élevée, la résistance à l'usure et les excellentes performances de gestion thermique du carbure cimenté. Ils sont largement utilisés dans les secteurs de haute technologie exigeant une dissipation thermique efficace, une résistance mécanique et une adaptabilité environnementale. Les paragraphes suivants présentent les différents types de substrats de dissipation thermique en carbure cimenté, des descriptions plus détaillées et des scénarios d'application sous trois angles : types, caractéristiques et domaines d'application.

### 1. Types de substrats de dissipateurs thermiques en carbure

Les substrats de dissipation thermique en carbure cimenté se divisent en plusieurs types selon leur composition, leur mécanisme de conductivité thermique et les exigences de leur application. Chaque type est optimisé grâce à des ratios et des procédés spécifiques pour répondre aux exigences de gestion thermique de différents scénarios :

#### Substrat de dissipation thermique en carbure cimenté tungstène-cobalt pur (WC-Co)

**Composition :** Carbure de tungstène (WC) comme phase dure, cobalt (Co) comme phase liante, le rapport typique est WC-6%Co, WC-10%Co ou WC-15%Co.

##### Fonctionnalités professionnelles :

Conductivité thermique  $\sim 100-150 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , dépend de la conductivité de la phase Co (résistivité  $\sim 10^{-5} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$ ) et de la contribution des phonons du WC.

Dureté HV 1800-2000  $\pm 30$ , résistance à la compression  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , porosité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ , granulométrie  $0,5-2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ .

Résistance à haute température  $> 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ , coefficient de dilatation thermique  $\sim 5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , perte de masse  $< 0,01\% \pm 0,001\%$  à  $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ .

**Procédé de fabrication :** HIP ( $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) assure la densité, la rectification de précision (granulométrie #1200-2000  $\pm 100$ ) contrôle la rugosité de surface  $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

#### Substrat composite de dissipation thermique en carbure de tungstène-cobalt cimenté-carbure de silicium (WC-Co- SiC)

**Composition :** Matrice WC-Co dopée au SiC (10%-30%  $\pm 2\%$ ), granulométrie SiC  $0,1-1 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ , pour améliorer la conductivité thermique et la résistance aux chocs thermiques.

##### Fonctionnalités professionnelles :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conductivité thermique  $200-300 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , Contribution SiC  $\sim 270 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , coefficient de diffusion thermique  $> 60 \text{ mm}^2/\text{s} \pm 5 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

Dureté HV  $1900-2200 \pm 30$ , résistance aux chocs thermiques ( $\Delta T > 500^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ , taux de croissance des fissures  $< 0,001 \text{ mm/cycle} \pm 0,0001 \text{ mm/cycle}$ ).

Résistance à la corrosion  $< 0,005 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$  (en solution acide ou alcaline), coefficient de dilatation thermique  $\sim 4,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$ .

**Procédé de fabrication** : SPS ( $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) pour obtenir une répartition uniforme du SiC, traitement de surface au laser (puissance  $200-400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ ) pour optimiser le chemin de conduction thermique.

### **Substrat de dissipation thermique isolant en carbure de tungstène-cobalt cimenté-nitrure d'aluminium (WC-Co- AlN )**

**Composition** : Matrice WC-Co dopée à l'AlN ( $15\%-25\% \pm 2\%$ ), granulométrie AlN  $0,5-2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , assurant une isolation électrique.

#### **Fonctionnalités professionnelles :**

Conductivité thermique  $150-250 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , résistivité  $> 10^6 \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^5 \Omega\cdot\text{cm}$ , résistance au claquage  $> 15 \text{ kV/mm} \pm 1 \text{ kV/mm}$ .

Dureté HV  $1800-2100 \pm 30$ , résistance à la flexion  $> 2200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , coefficient de dilatation thermique  $\sim 4,8 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$ , bonne correspondance avec les puces Si ( $< 3\% \pm 0,5\%$ ).

Résistance à haute température  $> 900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ , perte de masse  $< 0,01\% \pm 0,001\%$  à  $900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ .

**Procédé de fabrication** : dépôt CVD ( $800-1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) d'une couche d'AlN (épaisseur  $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ), HIP ( $1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) pour améliorer la liaison de l'interface.

### **Substrat composite de dissipation thermique en carbure de tungstène-cobalt cimenté-nitrure de bore (WC-Co-BN)**

**Composition** : Matrice WC-Co dopée au nitrure de bore hexagonal (h-BN,  $5\%-15\% \pm 1\%$ ), épaisseur de couche h-BN  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , pour améliorer l'autolubrification et la conductivité thermique.

#### **Fonctionnalités professionnelles :**

La conductivité thermique est de  $180-280 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . La conductivité thermique du h-BN le long du plan est d'environ  $300 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  et dans la direction verticale d'environ  $30 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .

Dureté HV  $1700-2000 \pm 30$ , coefficient de frottement  $< 0,1 \pm 0,01$ , résistance à l'usure  $< 0,03 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ .

Résistance à la corrosion  $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , coefficient de dilatation thermique  $\sim 5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$ .

**Procédé de fabrication** : broyage à billes (vitesse  $200-300 \text{ tr/min} \pm 10 \text{ tr/min}$ , temps  $24-48 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ ) pour assurer une dispersion uniforme du h-BN, frittage SPS ( $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

#### Core Advantages

**30 years of experience:** We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

**Precision customization:** Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

**Quality cost:** Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

#### Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

#### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Substrat de dissipation thermique multiphasé en carbure de tungstène-cobalt-carbure de titane-carbure de tantale (WC-Co- TiC -TaC )**

**Composition :** Matrice WC-Co dopée avec TiC (5%-10%  $\pm$  0,5%) et TaC (2%-5%  $\pm$  0,5%), granulométrie 0,5-1,5  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$  , pour améliorer les performances à haute température.

**Fonctionnalités professionnelles :**

Conductivité thermique 120-200 W/ m $\cdot$ K  $\pm$  10 W/ m $\cdot$  K , résistance à haute température > 1000°C  $\pm$  50°C, perte de masse < 0,01%  $\pm$  0,001% à 1000°C  $\pm$  50°C.

Dureté HV 2000-2300  $\pm$  30, résistance à la fatigue thermique (> 6000 fois  $\pm$  500 fois), résistance à la compression > 4500 MPa  $\pm$  100 MPa.

Résistance à la corrosion < 0,005 mm/an  $\pm$  0,001 mm/an, coefficient de dilatation thermique  $\sim$  5,2  $\times 10^{-6}$  /°C  $\pm$  0,5  $\times 10^{-6}$  /°C.

**Procédé de fabrication :** HIP (1400°C  $\pm$  10°C, 250 MPa  $\pm$  5 MPa) combiné à la projection plasma d'un revêtement TiC-TaC ( épaisseur 10-20  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,2  $\mu\text{m}$  ) .

**Substrat de dissipation thermique nanocomposite WC-Co-graphène**

**Composition :** Matrice WC-Co dopée au graphène (1%-5%  $\pm$  0,5%), épaisseur de la feuille de graphène < 0,01  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,001  $\mu\text{m}$  , longueur 1-10  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,5  $\mu\text{m}$  .

**Fonctionnalités professionnelles :**

La conductivité thermique est de 250-350 W/ m $\cdot$ K  $\pm$  10 W/ m $\cdot$  K , le graphène contribue à environ 5 000 W/ m $\cdot$ K  $\pm$  500 W/ m $\cdot$ K (le long du plan).

Dureté HV 1900-2200  $\pm$  30, résistance à la flexion >2300 MPa  $\pm$  100 MPa, diffusivité thermique >80 mm<sup>2</sup>/s  $\pm$  5 mm<sup>2</sup>/s.

Résistance à la corrosion < 0,008 mm/an  $\pm$  0,001 mm/an, coefficient de dilatation thermique  $\sim$  4,5  $\times 10^{-6}$  /°C  $\pm$  0,5  $\times 10^{-6}$  /°C.

**Procédé de fabrication :** Dispersion ultrasonique en phase liquide (puissance 200-400 W  $\pm$  10 W, temps 1-2 h  $\pm$  0,1 h) graphène mixte, frittage SPS (1350°C  $\pm$  10°C, 60 MPa  $\pm$  1 MPa).

**Substrat de dissipation thermique à haute résistance en carbure de tungstène-cobalt cémenté-carbure de bore (WC-Co-B4C)**

**Composition :** Matrice WC-Co dopée au carbure de bore (B4C, 5%-15%  $\pm$  1%), granulométrie B4C 0,5-2  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$  , pour améliorer la résistance à l'usure et la résistance aux hautes températures.

**Fonctionnalités professionnelles :**

La conductivité thermique est de 150 à 250 W/ m $\cdot$ K  $\pm$  10 W/ m $\cdot$  K , avec B4C contribuant à hauteur d'environ 200 W/ m $\cdot$ K  $\pm$  10 W/ m $\cdot$  K .

Dureté HV 2000-2400  $\pm$  30, résistance à l'usure <0,02 mm<sup>3</sup> / N  $\cdot$  m  $\pm$  0,01 mm<sup>3</sup> / N  $\cdot$  m, résistance à la compression >5000 MPa  $\pm$  100 MPa.

Résistance à haute température > 900 °C  $\pm$  20 °C, perte de masse < 0,01 %  $\pm$  0,001 % à 900 °C  $\pm$  20 °C, coefficient de dilatation thermique  $\sim$  5  $\times 10^{-6}$  /°C  $\pm$  0,5  $\times 10^{-6}$  /°C.

**Procédé de fabrication :** HIP (1350°C  $\pm$  10°C, 200 MPa  $\pm$  5 MPa) combiné à une pré-dispersion B4C (ultrasons 30-60 min  $\pm$  5 min), état de surface Ra <0,1  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,01  $\mu\text{m}$  .

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## **Substrat de dissipation thermique résistant à l'usure en carbure de tungstène-cobalt cémenté-nitrure de titane (WC-Co- TiN )**

**Composition :** Matrice WC-Co dopée au nitrure de titane (TiN, 5%-10%  $\pm$  0,5%), granulométrie TiN 0,5-1,5  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$  , pour améliorer la résistance à l' usure et la conductivité thermique.

### **Fonctionnalités professionnelles :**

Conductivité thermique 120-200 W/ m $\cdot$ K  $\pm$  10 W/ m $\cdot$  K , Le TiN contribue à environ 20 W/ m $\cdot$ K  $\pm$  5 W/ m $\cdot$ K (effet auxiliaire).

Dureté HV 1900-2200  $\pm$  30, résistance à l'usure  $< 0,03 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , résistance à la flexion  $> 2100 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ .

Résistance à la corrosion  $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , résistance aux hautes températures  $> 850 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , coefficient de dilatation thermique  $\sim 5,5 \times 10^{-6} / \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Procédé de fabrication :** SPS (1300 $^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , 50 MPa  $\pm$  1 MPa) combiné à un revêtement PVD TiN (épaisseur 5-15  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  ) , rectification de précision pour optimiser la surface.

## **2. Caractéristiques du substrat de dissipation thermique en carbure cémenté**

Les performances des plaques de base de dissipateur thermique en carbure cémenté sont obtenues grâce à la conception des matériaux et à l'optimisation des procédés. Leurs caractéristiques présentent des avantages significatifs en conditions de fortes charges thermiques, de contraintes mécaniques et d'environnements corrosifs :

### **conductivité thermique élevée**

Plage : 100-350 W/ m $\cdot$ K  $\pm$  10 W/ m $\cdot$ K (selon le type), les types enrichis en graphène ou en SiC peuvent atteindre 300-350 W/ m $\cdot$ K  $\pm$  10 W/ m $\cdot$  K .

Mécanisme : Le couplage phonon-électron du WC-Co (libre parcours moyen des phonons  $\sim 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ) et la conductivité thermique du réseau du SiC /h-BN (vitesse des phonons  $\sim 10^4 \text{ m/s} \pm 10^3 \text{ m/s}$ ) fonctionnent en synergie.

Avantages : Temps de réponse thermique  $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ , prise en charge de la densité de flux thermique  $> 100 \text{ W/cm}^2 \pm 10 \text{ W/cm}^2$  , adapté à l'électronique haute puissance.

### **Stabilité à haute température**

Plage :  $> 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$  ( type TiC -TaC ou B4C  $> 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ), durée de vie du cycle thermique  $> 5000 \text{ fois} \pm 500 \text{ fois}$ .

Mécanisme : La phase stable à haute température du WC (point de fusion  $\sim 2870 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) et le tampon plastique de la phase Co (limite d'élasticité  $\sim 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) résistent conjointement aux contraintes thermiques.

Avantages : Bonne adaptation de la dilatation thermique ( $< 5\% \pm 1\%$  avec SiC / AlN ) , fissures de fatigue thermique réduites (longueur  $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ).

### **Excellentes propriétés mécaniques**

Dureté : HV 1700-2400  $\pm$  30, résistance à la compression 4000-5000 MPa  $\pm$  100 MPa, résistance à la flexion 2000-2300 MPa  $\pm$  100 MPa.

Mécanisme : Renforcement par dispersion de nano-grains (0,5-1  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  ) et de phases renforçantes (telles que TiC , B4C), ténacité à la rupture  $10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  .

### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Avantages : Résistant aux chocs mécaniques ( $>1000 \text{ J/cm}^2 \pm 100 \text{ J/cm}^2$ ), tolérance aux vibrations  $>50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ , adapté aux environnements à forte charge.

#### Stabilité chimique et résistance à la corrosion

Taux de corrosion :  $< 0,005\text{-}0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , type TiC-TaC ou graphène  $< 0,005 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ .

Mécanisme : La couche de passivation de surface (épaisseur  $< 0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$ ) et la phase inerte (affinité électronique  $\sim 0,87 \text{ eV} \pm 0,05 \text{ eV}$ ) résistent à la corrosion acide et alcaline.

Avantages : Convient aux environnements électrolytiques (pH 7-9) ou d'eau de mer, migration ionique  $< 0,1 \mu\text{g/cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g/cm}^2$ .

#### Propriétés électriques (isolation facultative)

Résistivité :  $10^{-5} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$  (WC-Co pur),  $> 10^6 \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^5 \Omega\cdot\text{cm}$  (Type AlN ou TiN).

Mécanisme : La bande interdite AlN  $\sim 6,2 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$  ou les propriétés du semi-conducteur TiN (bande interdite  $\sim 3,4 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$ ) assurent une isolation et une résistance au claquage  $>15 \text{ kV/mm} \pm 1 \text{ kV/mm}$ .

Avantages : Prend en charge les appareils haute tension ( $> 1000 \text{ V} \pm 100 \text{ V}$ ), efficacité de blindage électromagnétique  $> 90 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$ .

#### Traitement et personnalisation

Précision :  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , rugosité de surface  $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Mécanisme : SLM (épaisseur de couche  $20\text{-}50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) ou EDM (précision  $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) pour réaliser des microstructures (par exemple microcanaux  $0,1\text{-}0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ ).

Avantages : Prend en charge les conceptions de formes spéciales (erreur de surface complexe  $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ ), optimisation du poids  $12\text{-}15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,5 \text{ g/cm}^3$ .

### 3. Domaines d'application du substrat de dissipation thermique en carbure cémenté

Les substrats de dissipateur thermique en carbure cémenté sont de plus en plus utilisés dans les environnements à forte charge thermique et difficiles en raison de leurs propriétés complètes :

#### Application dans le domaine des véhicules à énergie nouvelle

Module de batterie d'alimentation : taille  $200\text{-}500 \text{ mm} \times 200\text{-}300 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ , gère une température de  $30\text{-}60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , flux thermique  $>50 \text{ W/cm}^2 \pm 5 \text{ W/cm}^2$ .

Contrôleur de moteur : prend en charge IGBT (puissance  $> 100 \text{ kW} \pm 10 \text{ kW}$ ), température de jonction  $< 125^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , résistance thermique  $< 0,1 \text{ K/W} \pm 0,01 \text{ K/W}$ .

Pile de charge : module haute tension (courant  $> 200 \text{ A} \pm 20 \text{ A}$ , tension  $> 500 \text{ V} \pm 50 \text{ V}$ ), efficacité de dissipation thermique  $> 90 \% \pm 2 \%$ .

Piles à combustible à hydrogène : Support pour membrane échangeuse de protons (PEM, température  $60\text{-}80^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ), puissance de gestion thermique  $>20 \text{ W/cm}^2 \pm 2 \text{ W/cm}^2$ .

#### Avantages :

La dissipation rapide de la chaleur réduit le risque d'emballement thermique (gradient de température  $< 5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ ) et la durée de vie du cycle est  $> 1\,000 \text{ fois} \pm 100 \text{ fois}$ .

Résistance aux vibrations  $>50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ , conforme aux normes automobiles (ISO 16750), durée de vie mécanique  $>10^4 \text{ h} \pm 10^3 \text{ h}$ .

Corrosion anti-électrolytique  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , protection IP67, réduction de poids 10-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

15% ± 2%.

### Électronique aérospatiale

#### application :

Systèmes radar : Amplificateurs haute fréquence (puissance >50 W ± 5 W), -40°C à 150°C ± 10°C.

Composants du satellite : panneaux de contrôle thermique (100-300 mm × 100-200 mm ± 5 mm), flux thermique spatial >10 W/ m<sup>2</sup> ± 1 W/ m<sup>2</sup>.

Unité de contrôle de vol : Processeur de support (puissance > 30 W ± 3 W), vibration > 20 g ± 2 g.

#### Avantages :

Fluctuation de température ΔT >200°C ± 20°C, dilatation thermique correspondant à l'alliage Invar <5% ± 1%.

Résistance à la corrosion sous vide < 0,005 mm/an ± 0,001 mm/an, poids < 1 kg ± 0,1 kg.

### Équipement de communication 5G

#### application :

Module RF de station de base : puissance >100 W ± 10 W, flux thermique >30 W/ cm<sup>2</sup> ± 3 W/ cm<sup>2</sup>.

Réseau d'antennes : Carte multicanal (300-600 mm × 200-400 mm ± 5 mm), fréquence 3-5 GHz ± 0,1 GHz.

Répéteur miniaturisé : supporte un déploiement dense (puissance > 50 W ± 5 W), température < 70°C ± 5°C.

#### Avantages :

Conductivité thermique > 200 W/ m·K ± 10 W/ m·K, durée de vie > 10<sup>4</sup> h ± 10<sup>3</sup> h.

Interférence anti-électromagnétique > 90 dB ± 2 dB, densité d'intégration > 100 chips/ m<sup>2</sup> ± 10 chips/ m<sup>2</sup>.

### Électronique de puissance industrielle

#### application :

Onduleur : MOSFET/IGBT (puissance >200 kW ± 20 kW), résistance thermique <0,2 K/W ± 0,02 K/W.

Transformateur : plaque de base haute fréquence (200-400 mm × 200-300 mm ± 5 mm), fréquence 10-50 kHz ± 1 kHz.

Redresseur : Prend en charge les modules à courant élevé (>300 A ± 30 A), température <100°C ± 5°C.

#### Avantages :

Résistance haute tension >1000 V ± 100 V, isolation >10<sup>6</sup> Ω·cm ± 10<sup>5</sup> Ω·cm.

Résistance aux vibrations >100 g ± 10 g, fonctionnement continu >10<sup>5</sup> h ± 10<sup>4</sup> h.

### Équipements de fabrication haut de gamme

#### application :

Laser : Diode de forte puissance (puissance > 50 W ± 5 W), flux thermique > 20 W/ cm<sup>2</sup> ± 2 W/ cm<sup>2</sup>.

Machine CNC : plaque de broche (300-500 mm × 200-400 mm ± 5 mm), vitesse > 10 000 tr/min ±

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

1 000 tr/min.

Équipement semi-conducteur : Support de plaques chauffantes de gravure (température 200-400°C  $\pm$  20°C), uniformité thermique  $< 2^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

**Avantages :**

Dureté HV 1800-2300  $\pm$  30, résistance à l'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ .

Stabilité thermique  $> 800^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ , durée de vie  $> 10^4 \text{ h} \pm 10^3 \text{ h}$ .

**Équipement électronique médical**

**application :**

Aimants IRM : Support de refroidissement des aimants supraconducteurs (température  $< 20 \text{ K} \pm 2 \text{ K}$ ), flux thermique  $> 10 \text{ W} / \text{cm}^2 \pm 1 \text{ W} / \text{cm}^2$ .

Ablateurs par radiofréquence : plaque de gestion thermique (taille 100-200 mm  $\times$  100-150 mm  $\pm$  5 mm), puissance  $> 50 \text{ W} \pm 5 \text{ W}$ .

**Avantages :**

Revêtement biocompatible (TiN, taux antibactérien  $> 90\% \pm 2\%$ ), conductivité thermique  $> 150 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$ .

Résistant aux radiations ( $< 0,01 \text{ Gy/h} \pm 0,001 \text{ Gy/h}$ ), précision  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ .

**Équipements d'énergie renouvelable**

**application :**

Onduleur photovoltaïque : supporte les modules de forte puissance (puissance  $> 150 \text{ kW} \pm 15 \text{ kW}$ ), température  $< 90^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Unité de contrôle de l'énergie éolienne : plaque de gestion thermique (taille 300-600 mm  $\times$  200-400 mm  $\pm$  5 mm), vibration  $> 30 \text{ g} \pm 3 \text{ g}$ .

**Avantages :**

Conductivité thermique  $> 200 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$ , durée de vie  $> 10^4 \text{ h} \pm 10^3 \text{ h}$ .

Résistance à la corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , adapté à l'environnement extérieur (protection IP65).

**4. Orientation future du développement du substrat de dissipation thermique en carbure cémenté**

**Optimisation des matériaux :** Développement de composites quadriphasés WC- SiC - AlN - Graphène ( SiC 20%-30%  $\pm$  2%, AlN 10%-20%  $\pm$  2%, Graphène 1%-5%  $\pm$  0,5%), conductivité thermique  $> 400 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$ .

**de procédé :** Fabrication de microcanaux multi-échelles par EBM (densité de courant du faisceau  $> 10^4 \text{ A/m}^2 \pm 10^3 \text{ A/m}^2$ ), résistance thermique  $< 0,02 \text{ K/W} \pm 0,01 \text{ K/W}$ .

**Intelligent :** Le thermocouple intégré (précision  $< 0,05^{\circ}\text{C} \pm 0,01^{\circ}\text{C}$ ) et l'algorithme d'IA optimisent l'efficacité de dissipation thermique  $> 95\% \pm 2\%$ .

**Durabilité :** Recyclage de la poudre WC-Co (taux de recyclage  $> 95\% \pm 2\%$ ) et frittage vert (consommation énergétique  $< 6 \text{ kWh/kg} \pm 1 \text{ kWh/kg}$ ).

Les substrats de dissipation thermique en carbure cémenté présentent un fort potentiel d'application

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

dans les secteurs de haute technologie. Leur demande dans les véhicules à énergies nouvelles, l'aérospatiale et les communications 5G ne cesse de croître. À l'avenir, grâce aux composites multiphasés et à la fabrication intelligente, les performances de gestion thermique et la compétitivité sur le marché seront encore améliorées.

## 5. Normes connexes pour les substrats de dissipation thermique en carbure cimenté

Un système international pleinement unifié et largement reconnu n'a pas encore été mis en place, principalement en raison de la diversité de ses domaines d'application (véhicules à énergies nouvelles, aérospatiale, communications 5G, etc.) et de l'évolution rapide de la technologie. Voici un aperçu des normes susceptibles de s'appliquer aux substrats de dissipation thermique en carbure cimenté, basées sur les pratiques industrielles existantes et les normes de matériaux pertinentes :

### Normes générales sur les matériaux

#### Exigences techniques générales pour le carbure cimenté

Reportez-vous à la norme nationale chinoise « GB/T 5242-2006 Conditions techniques générales pour le carbure cimenté », qui spécifie la composition, les propriétés (telles que la conductivité thermique, la dureté, la résistance à la corrosion) et les exigences de contrôle qualité du carbure cimenté, et peut être utilisée comme base pour la sélection des matières premières pour les substrats de dissipation thermique.

#### Propriétés des matériaux de gestion thermique

Les substrats de dissipation thermique doivent répondre à une conductivité thermique élevée ( $> 100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), un faible coefficient de dilatation thermique ( $< 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) et une résistance mécanique (dureté HV 1800-2000  $\pm 30$ ), qui sont largement adoptés dans l'industrie.

#### Normes relatives aux applications industrielles

##### Normes d'emballage électronique

Pour les substrats de dissipation thermique en carbure utilisés dans les appareils électroniques, veuillez vous référer à la « Spécification des matériaux stratifiés IPC-4101 », qui implique les exigences de performance thermique et de stabilité dimensionnelle des matériaux de substrat à haute conductivité thermique et convient à la conception de dissipation thermique dans les emballages microélectroniques.

##### Domaine des véhicules à énergie nouvelle

Le substrat de dissipation thermique peut devoir être conforme aux « Conditions techniques QC/T 1073-2020 pour les composants de gestion thermique des batteries de véhicules électriques », qui imposent certaines exigences en matière de résistance thermique ( $< 0,1 \text{ K/W} \pm 0,01 \text{ K/W}$ ), de résistance à la température ( $> 800 ^\circ\text{C} \pm 20 ^\circ\text{C}$ ) et de résistance aux vibrations ( $> 50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ ) des matériaux de gestion thermique.

##### Normes aérospatiales

Reportez-vous à la spécification de traitement thermique AMS 2750 ou à des normes militaires similaires pour la stabilité thermique et la conductivité thermique des matériaux dans des environnements à haute température, adaptés aux substrats de dissipateur thermique avionique.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

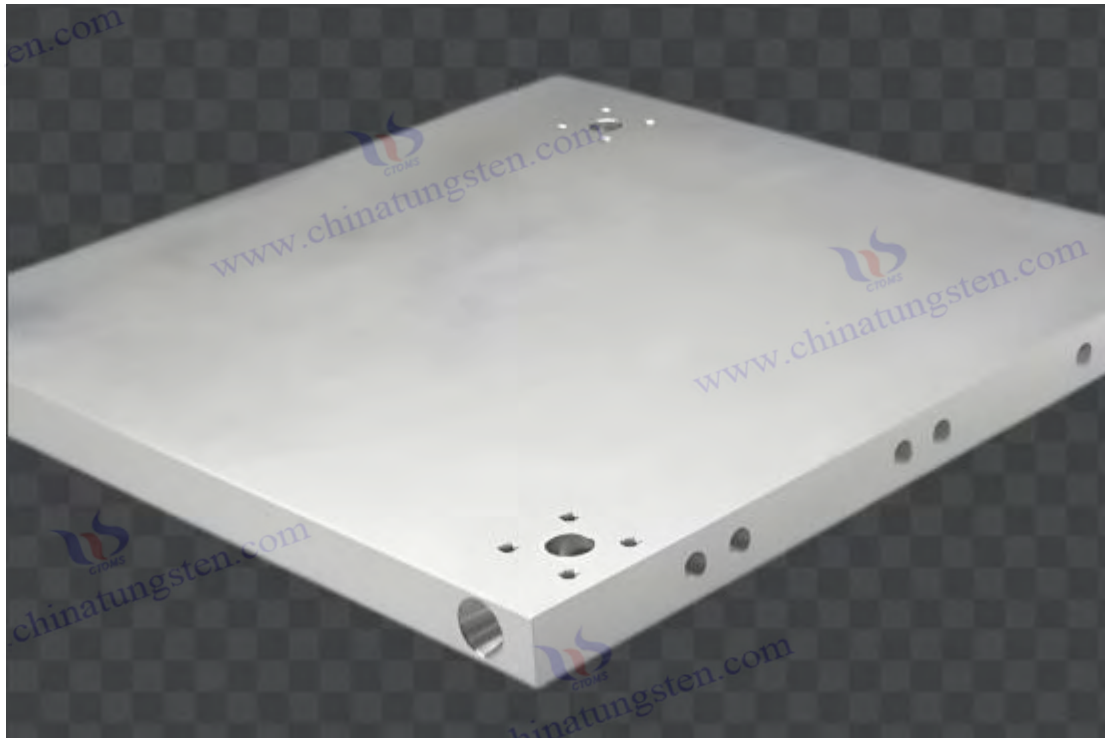
## Normes internationales de référence

### normes ISO

La norme ISO 18514 (Test de conductivité thermique des composites céramiques et métalliques) peut être utilisée pour évaluer la conductivité thermique des substrats de dissipateur thermique en carbure cimenté ; la norme ISO 17864 (Test de dilatation thermique des céramiques avancées) peut guider les tests de correspondance de dilatation thermique.

### Normes ASTM

La norme ASTM E1461 (mesure de la diffusivité thermique) peut être utilisée pour vérifier l'efficacité de la gestion thermique des substrats de dissipateur thermique pour les applications hautes performances.



## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## Quelles sont les applications du carbure cémenté en catalyse et en stockage d'énergie ?

Matériau traditionnel hautes performances, le carbure cémenté (avec un système carbure de tungstène-cobalt, WC-Co, comme noyau) a progressivement gagné en popularité ces dernières années dans la recherche appliquée en catalyse et en stockage d'énergie, notamment dans le contexte du développement rapide des technologies de conversion et de stockage d'énergie. Grâce à son excellente résistance mécanique, sa résistance à la corrosion, sa stabilité à haute température et ses caractéristiques de structure électronique uniques, le carbure cémenté a démontré un potentiel significatif en électrocatalyse, catalyse thermique, piles à combustible, supercondensateurs et stockage d'hydrogène grâce à son association avec les alliages à haute entropie (HEA), les nanotechnologies et les technologies de fonctionnalisation de surface. Bien que son application dans le domaine biomédical soit plus mature, l'exploration du carbure cémenté dans le domaine de la catalyse et du stockage d'énergie reste à l'avant-garde, impliquant des croisements multidisciplinaires, notamment la science des matériaux, l'électrochimie, la physico-chimie et la simulation numérique. Les paragraphes suivants détaillent les applications spécifiques du carbure cémenté dans ces domaines, en combinant les dernières avancées de la recherche et les connaissances techniques professionnelles afin d'enrichir considérablement son système de connaissances.

### Applications en catalyse

#### Réaction électrocatalytique

L'application du carbure cémenté dans le domaine de l'électrocatalyse est principalement axée sur l'optimisation catalytique des processus clés des réactions électrochimiques, telles que la réaction de réduction de l'oxygène (ORR), la réaction d'évolution de l'hydrogène (HER) et la réaction d'évolution de l'oxygène (OER). Ces réactions sont à la base de l'énergie hydrogène, des piles à combustible et de la technologie d'électrolyse de l'eau. Les catalyseurs traditionnels à base de métaux précieux (tels que le platine Pt, l'iridium Ir et le ruthénium Ru) sont limités par leur coût élevé et la rareté des ressources, tandis que le carbure cémenté (en particulier le WC et ses dérivés) est devenu un substitut potentiel des métaux non précieux en raison de sa structure électronique en bande d de type Pt et de son excellente stabilité chimique.

**Réaction de réduction de l'oxygène (ORR) :** le carbure cémenté à base de WC-Co améliore considérablement les performances catalytiques de l'ORR en étant associé à des alliages à haute entropie (tels que PtPdFeCoNi). L'effet de stabilisation de l'entropie et la distorsion du réseau des alliages à haute entropie améliorent l'exposition des sites actifs et l'efficacité du transfert d'électrons. Par exemple, des études ont montré que l'activité massique et l'activité spécifique des nanoparticules de PtPdFeCoNi à 0,9 V par rapport à RHE sont respectivement de 0,25 A/mg<sub>Pt</sub> et 0,12 mA/cm<sup>2</sup>, soit 6,2 fois et 4,9 fois supérieures à celles du catalyseur commercial à 20 % Pt/C. De plus, le WC, en tant que support, peut empêcher l'agglomération et l'oxydation des nanoparticules de Pt. Les tests de durabilité montrent qu'il conserve encore plus de 90 % d'activité après 10 000 cycles, ce qui est mieux que 70 à 80 % du Pt/C.

**Réaction d'évolution de l'hydrogène (HER) et réaction d'évolution de l'oxygène (OER) :** les

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nanostructures dérivées du carbure (par exemple, Ni<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Mo<sub>10</sub>Co<sub>35</sub>Cr<sub>15</sub> HEA) présentent une faible surtension (environ 107 mV à 10 mA/cm<sup>2</sup>) et une pente de Tafel (<50 mV/déc) dans HER, indiquant une cinétique de réaction rapide. Pour l'OER, les matériaux à base de WC-Co ont une énergie libre d'adsorption optimisée ( $\Delta G_{H^*}$  proche de 0 eV) par dopage de surface (par exemple, Ni ou Fe), avec une surtension d'environ 300 mV à une densité de courant de 10 mA/cm<sup>2</sup> dans un électrolyte alcalin (1 M KOH) et une stabilité allant jusqu'à 50 heures, ce qui les rend adaptés à l'électrolyse de l'eau à grande échelle pour produire de l'hydrogène.

**Applications :** Ces catalyseurs sont largement utilisés dans les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), les électrolyseurs alcalins et les systèmes de production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables.

#### Séparation de l'eau et production d'hydrogène

La séparation complète de l'eau ( $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ ) est une technologie essentielle pour la production durable d'hydrogène, et le carbure cimenté a montré un potentiel électrocatalytique bifonctionnel dans ce domaine. Dans l'étude, des réseaux de nanotubes CoS<sub>2</sub> creux dérivés du carbure cimenté ont été préparés par des procédés de dépôt en phase liquide et de sulfuration comme catalyseurs bifonctionnels pour la cathode (HER) et l'anode (OER). Dans un électrolyte KOH 1,5 M, la tension de la cellule était de 1,67 V à une densité de courant de 10 mA/cm<sup>2</sup>, ce qui est bien inférieur à la paire IrO<sub>2</sub>/Pt traditionnelle (1,8 V), et l'efficacité faradique était toujours supérieure à 95 % après 20 heures de fonctionnement continu. Les excellentes performances de ce matériau proviennent de sa surface spécifique élevée (> 100 m<sup>2</sup>/g) et de ses nombreux sites de bord actifs. De plus, le catalyseur à base de WC-Co est encore amélioré en termes de conductivité et de stabilité en étant composé de nanotubes de carbone (CNT) ou de graphène, ce qui le rend adapté aux dispositifs de séparation de l'eau alimentés par l'énergie solaire.

#### Réaction de réduction du CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>RR) La

réduction du CO<sub>2</sub> est un moyen important de recyclage du carbone. Les matériaux à base de carbure cimenté présentent un potentiel en CO<sub>2</sub>RR en ajustant la structure électronique et l'énergie d'adsorption de surface. Après la combinaison d'alliages à haute entropie (tels que CuFeCoNiZn) avec du WC, l'équilibre adsorption/désorption des molécules de CO<sub>2</sub> et des intermédiaires est optimisé, et des hydrocarbures C<sub>2</sub><sup>+</sup> (tels que l'éthanol et l'éthylène, efficacité Faraday > 60 %) sont générés avec une sélectivité élevée. Les calculs de la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) montrent que le déplacement vers le bas du centre de la bande d- du site Cu améliore la réaction de couplage \*CO, tandis que la conductivité du WC (> 100 S/cm) favorise le transfert d'électrons. En 2025, avec l'avancement des objectifs de neutralité carbone, ce catalyseur offre de vastes perspectives pour la capture et la conversion du CO<sub>2</sub> à l'échelle industrielle.

#### Application au stockage d'énergie

##### Technologie des batteries L' application de

matériaux à base de carbure cimenté dans les nouveaux systèmes de batteries se reflète principalement dans le développement de matériaux d'électrodes, en particulier dans les batteries lithium-air, les batteries zinc-air et les batteries lithium-ion.

**Batteries lithium-air :** les oxydes de spinelle à haute entropie (tels que FeCoNiMnPtIr) utilisés comme catalyseurs cathodiques réduisent significativement la surtension de recharge (< 0,5 V vs.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Li/Li<sup>+</sup>) et maintiennent une rétention de capacité de 80 % (500 cycles) à une densité de courant de 1000 mA/g. Son effet synergique multi-éléments optimise la cinétique de formation/décomposition de O<sub>2</sub><sup>-</sup> et Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ce qui le rend adapté au stockage d'énergie à haute densité énergétique.

**Batteries zinc-air** : les nanoparticules dérivées de WC-Co ont des activités ORR et OER améliorées grâce à une modification de surface (comme le dopage N), avec une tension en circuit ouvert de 1,45 V et une durée de vie de plus de 200 heures, ce qui les rend adaptées aux alimentations de secours pour les véhicules électriques.

**Batteries lithium-ion** : les alliages à haute entropie à base de carbure cémenté (tels que TiNbTaZrHf) utilisés comme matériaux d'électrode négative présentent une capacité spécifique élevée (> 500 mAh/g) et une excellente stabilité de cycle (dégradation de capacité < 10 % après 1 000 cycles), et leur effet d'entropie élevé inhibe l'expansion du volume.

Les nanoalliages à haute entropie dérivés du carbure cémenté pour supercondensateurs (tels que NiFeCoCuMn) ont été développés comme matériaux d'électrode pour supercondensateurs en raison de leur structure poreuse (porosité de 50 % à 70 % ± 5 %) et de leur surface spécifique élevée (> 200 m<sup>2</sup> /

g). Dans un électrolyte 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, la capacité peut atteindre 300 F/g, la densité énergétique est de 20 Wh/kg, la densité de puissance est de 500 W/kg et la stabilité du cycle est jusqu'à 10 000 fois supérieure (taux de rétention de capacité > 90 %). Ses excellentes performances sont attribuées au transfert de charge et à la distorsion du réseau entre plusieurs éléments, ce qui améliore la diffusion des ions de l'électrolyte et la capacité de stockage de charge, et convient à la libération instantanée d'énergie dans les véhicules hybrides.

Les matériaux combinant carbure cémenté et alliages à haute entropie pour **le stockage d'énergie de l'hydrogène (tels que**

les composites à base de CoCrFeNiTi) présentent un stockage d'hydrogène élevé (> 2 % en poids) et une stabilité structurelle dans le stockage d'énergie de l'hydrogène à l'état solide. Les matériaux à base de WC-Co optimisent la dissociation et la diffusion des molécules d'hydrogène par modification de surface (comme un revêtement de Pd, épaisseur 10-20 nm ± 2 nm), avec une plage de températures de fonctionnement de 25-300 °C ± 10 °C et une durée de vie du cycle d'absorption/déshydrogénation de l'hydrogène plus de 100 fois supérieure. Associé à une structure nanoporeuse (taille des pores 5-20 nm ± 1 nm), ce matériau est adapté aux dispositifs de stockage d'énergie mobiles et aux réservoirs de stockage d'hydrogène pour les véhicules à pile à combustible à hydrogène (FCEV), et est en phase pilote industrielle en 2025.

#### Avantages et défis techniques

##### Avantages :

**Stabilité mécanique et chimique** : La dureté élevée (HV 1800-2000 ± 30) et la résistance à la corrosion (taux de corrosion < 0,01 mm/an ± 0,001 mm/an) du système WC-Co lui permettent de bien fonctionner dans des environnements difficiles.

**Rentabilité** : Le carbure cémenté combiné à un alliage à haute entropie peut réduire considérablement la quantité de métaux précieux utilisés (charge de Pt jusqu'à 5 % ± 1 %), réduisant ainsi les coûts du catalyseur.

**Accordabilité** : La structure électronique et les propriétés de surface du carbure cémenté peuvent être contrôlées avec précision par dopage d'éléments (tels que TiC, TaC) ou ingénierie de surface.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

défi :

**Complexité de la synthèse** : La préparation d'alliages à haute entropie et de nanostructures nécessite un contrôle précis de la composition et des conditions de traitement thermique (telles que SPS  $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , HIP  $1300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ), et le coût du procédé est élevé.

**Limitation du site actif** : L'inertie de surface du WC limite son activité catalytique inhérente, et il faut s'appuyer sur la nano-échelle ou le composite pour augmenter la surface spécifique ( $<100 \text{ m}^2/\text{g}$ ).

**Lacunes de la recherche** : davantage de données sont nécessaires pour étayer la stabilité à long terme des alliages à haute entropie dans des environnements atomiques complexes, et la simulation DFT et l'apprentissage automatique nécessitent une vérification supplémentaire.

#### Orientation du développement futur

Avec l'accélération de la transformation énergétique en 2025, l'application du carbure cimenté dans la catalyse et le stockage d'énergie se concentrera sur les directions suivantes :

**Nano-ingénierie** : Développer des nanoparticules ultrafines ( $<10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ) et des structures poreuses pour augmenter la densité du site actif.

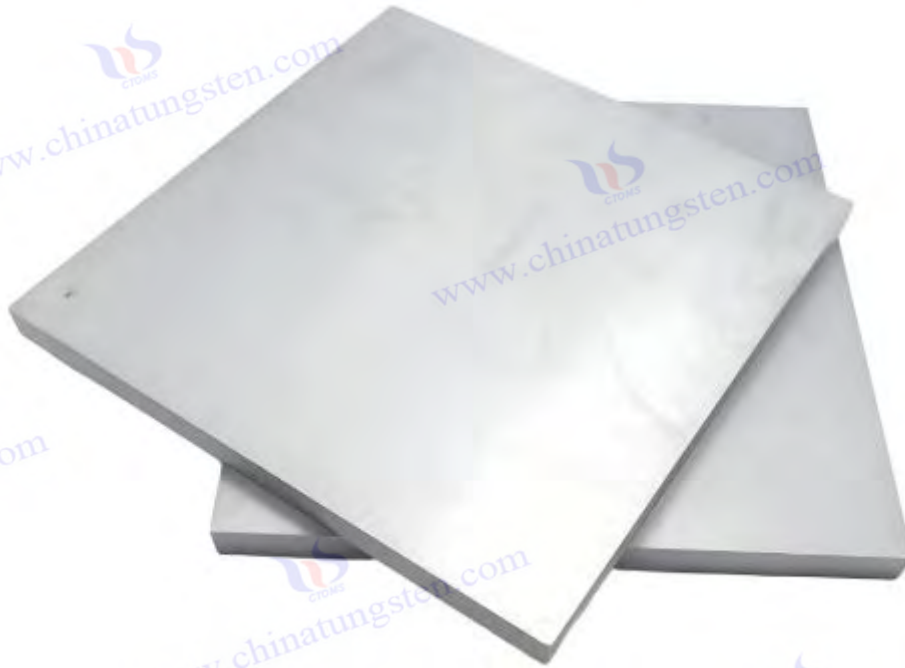
**Conception intelligente** : accélérez l'optimisation des matériaux en utilisant l'apprentissage automatique pour prédire la composition optimale des alliages et les schémas de modification de surface.

**Durabilité** : Développer des formulations de carbure cimenté à faible teneur en cobalt ou sans cobalt conformes aux normes environnementales RoHS et REACH.

**Application intégrée** : Intégrer des catalyseurs au carbure aux systèmes de stockage d'énergie (tels que les systèmes hybrides pile à combustible-supercondensateur) pour améliorer l'efficacité globale.

Le potentiel du carbure cimenté dans les domaines de la catalyse et du stockage d'énergie est progressivement exploité grâce à des recherches collaboratives multidisciplinaires. Dans le cadre des objectifs d'économie de l'hydrogène et de neutralité carbone, son rôle de matériau de transition entre les industries traditionnelles et les technologies énergétiques émergentes prend une importance croissante.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## Quelles sont les applications du carbure cimenté dans le domaine médical ?

En tant que matériau d'ingénierie haute performance, le carbure cimenté (représenté par le système carbure de tungstène-cobalt, WC-Co) suscite un intérêt croissant de la part des universités et de l'industrie pour ses excellentes propriétés mécaniques, sa stabilité chimique et sa biocompatibilité potentielle dans le domaine médical. Le carbure cimenté est reconnu pour sa dureté ultra-élevée (plage de dureté HV 1800-2000  $\pm$  30, environ 9-10 sur l'échelle de dureté de Mohs), son excellente résistance à l'usure (taux d'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), sa résistance à la corrosion (taux de corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ) et son adaptabilité des performances grâce à l'ingénierie de surface et au dopage des éléments, ce qui en fait un matériau de base en orthopédie, en dentisterie, en cardiologie, en neurochirurgie et dans d'autres domaines. Ces dernières années, grâce aux progrès des technologies de fabrication avancées (telles que la fabrication additive et les nanotechnologies) et à la fonctionnalisation des surfaces, le champ d'application du carbure cimenté s'est étendu des outils chirurgicaux traditionnels aux implants et aux structures d'ingénierie tissulaire, démontrant ainsi une valeur clinique significative et un potentiel de recherche scientifique important. Ce qui suit explique de manière exhaustive et approfondie l'application du carbure cimenté dans le domaine médical, en examinant les scénarios d'application, les exigences techniques, les procédés de fabrication, les fondements de la science des matériaux et les orientations futures de la recherche, d'un point de vue académique et professionnel.

### Application du carbure cimenté dans les implants orthopédiques

En orthopédie, le carbure cimenté est principalement utilisé dans les prothèses de hanche, les prothèses de genou, les dispositifs de fixation vertébrale et les dispositifs de fusion articulaire, répondant à des besoins cliniques tels que la fixation des fractures, les prothèses articulaires, la correction vertébrale et la reconstruction osseuse. La conception de ces implants doit garantir une compatibilité biomécanique, une stabilité à long terme et une intégration parfaite aux tissus hôtes.

### Prothèse de hanche en carbure

La prothèse de hanche en carbure est utilisée pour traiter l'arthrose avancée, la nécrose aseptique de la tête fémorale, la déformation après une fracture de la hanche ou la dysplasie congénitale de la hanche par arthroplastie totale de la hanche (PTH). Ses principaux composants comprennent la tige fémorale et la cupule acétabulaire, qui sont généralement fabriquées à partir de la formule WC-6Co (teneur en cobalt 6 %  $\pm$  1 %, teneur en tungstène 94 %  $\pm$  1 %) par frittage par plasma d'étincelles (SPS, 1400 °C  $\pm$  10 °C, 50 MPa  $\pm$  1 MPa) ou pressage isostatique à chaud (HIP, 1300 °C  $\pm$  10 °C, 200 MPa  $\pm$  5 MPa) pour obtenir une densité élevée (porosité  $< 0,1 \text{ \%} \pm 0,01 \text{ \%}$ ) et une structure nano-grain uniforme (0,5-1  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ).

### Exigences techniques :

Propriétés mécaniques : Résistance à l'usure ( $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ) pour faire face à des charges cycliques à long terme ( $> 1000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ , comme marcher pendant environ  $10^6 - 10^7$  cycles, équivalent à 10-15 ans d'activités quotidiennes), et résistance à la compression  $> 4000 \text{ MPa}$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 100$  MPa pour résister à la force axiale du col fémoral.

Stabilité chimique : Résistance à la corrosion ( $< 0,01$  mm/an  $\pm 0,001$  mm/an) résiste à la corrosion électrochimique des ions chlorure ( $\text{Cl}^-$ , concentration d'environ 100-150 mM) dans les fluides corporels, les protéines et les enzymes.

Biocompatibilité : Viabilité cellulaire  $> 95\% \pm 2\%$  (test de cytotoxicité in vitro selon la norme ISO 10993-5), intégration osseuse  $> 95\% \pm 2\%$  (par l'hydroxyapatite,  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ , revêtement ou structure poreuse, taille des pores 100-400  $\mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$ , favorisant la fixation des ostéoblastes et la croissance osseuse).

TiN (épaisseur 5-15  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) appliqué par dépôt physique en phase vapeur (PVD, 400-600°C  $\pm 10^\circ\text{C}$ ) a réduit le coefficient de frottement ( $< 0,2 \pm 0,05$ ), réduit les particules d'usure du revêtement en polyéthylène ( $< 0,001$  mm<sup>3</sup>/cycle  $\pm 0,0001$  mm<sup>3</sup>/cycle) et réduit l'inflammation périprothétique (taux d'IL-6  $< 10$  pg/mL  $\pm 1$  pg/mL).

Durée de vie :  $> 10$  ans  $\pm 1$  an, environ  $10^6$  cycles de marche, convient aux patients âgés de 60 à 80 ans ou aux personnes ayant un niveau d'activité élevé.

**Scénarios d'application :** Largement utilisé chez les patients âgés atteints d'ostéoporose (score T de densité osseuse  $< -2,5$  SD) ou les patients jeunes ayant une activité élevée (comme les athlètes), en particulier dans les scénarios avec des charges de hanche élevées ( $> 1500$  N  $\pm 10$  N).

### Remplacement du genou au carbure Le

remplacement du genou au carbure est une procédure utilisée pour traiter l'arthrose, la polyarthrite rhumatoïde ou un traumatisme grave du genou (comme une déchirure du ménisque) en remplaçant l'extrémité inférieure du fémur, le plateau tibial et la surface rotulienne.

#### Exigences techniques :

Propriétés mécaniques : Résiste aux charges dynamiques ( $> 1500$  N  $\pm 10$  N, comme s'accroupir ou monter des escaliers), la résistance à l'usure ( $< 0,05$  mm<sup>3</sup> / N  $\cdot$  m  $\pm 0,01$  mm<sup>3</sup> / N  $\cdot$  m) réduit le taux d'usure annuel de la doublure en polyéthylène ( $< 0,1$  mm  $\pm 0,01$  mm) et la résistance à la fatigue ( $> 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois) peut faire face à environ 1 million de cycles de flexion et d'extension par an.

Biocompatibilité : Viabilité cellulaire  $> 95\% \pm 2\%$ , intégration osseuse  $> 95\% \pm 2\%$  (améliorée par une surface poreuse ou des facteurs de croissance tels que BMP-2).

Optimisation de surface : les nano-grains (0,5-1  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) améliorent la micro-uniformité, le revêtement PVD ZrN (5-15  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) améliore la dureté de la surface ( $> \text{HV } 1900 \pm 30$ ), le polissage mécano-chimique (CMP) contrôle la rugosité ( $\text{Ra} < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et réduit la réponse inflammatoire (IL-6  $< 10$  pg/mL  $\pm 1$  pg/mL).

Durée de vie :  $> 10$  ans  $\pm 1$  an, convient aux personnes actives de 50 à 70 ans ou aux patients sévèrement obèses ( $\text{IMC} > 30$  kg/m<sup>2</sup>).

**Scénarios d'application :** Convient aux patients souffrant d'une dégénérescence sévère du genou (grade III-IV de Kellgren-Lawrence) ou d'une déformation post-traumatique.

### Les dispositifs de fixation vertébrale en carbure

comprennent des vis pédiculaires et des systèmes de tiges utilisés pour la correction de la scoliose, la fixation des fractures par compression vertébrale ou la fusion vertébrale (comme la fusion lombaire).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Exigences techniques :

Propriétés mécaniques : résistance à la compression ( $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ), soutien vertébral, résistance à l'usure ( $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ) pour réduire l'usure entre le fil et le tissu osseux, et fournir une résistance à la fatigue ( $> 10^6 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ ) pour faire face aux contraintes dynamiques ( $> 2000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ ).

Biocompatibilité : Taux d'intégration osseuse  $> 95 \% \pm 2 \%$  (temps de fusion 3 à 6 mois  $\pm 1$  mois).

Traitement de surface : le procédé HIP ( $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) assure une porosité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$  (micropores  $< 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ), le dopage ZrC ( $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$ ) améliore la résistance à l'oxydation ( $< 0,01\% \pm 0,001\%$ ), et le polissage de surface ( $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) améliore la force de liaison interfaciale ( $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ).

Durée de vie :  $> 10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ .

**Scénarios d'application :** Convient aux patients âgés de 20 à 60 ans atteints de maladies de la colonne vertébrale, telles que la scoliose idiopathique de l'adolescent (angle de Cobb  $> 40^\circ$ ) ou les fractures ostéoporotiques chez les personnes âgées.

### Les dispositifs de fusion articulaire en carbure

sont utilisés pour la fusion des articulations du poignet, de la cheville ou des facettes vertébrales afin de traiter l'ankylose, l'arthrite dégénérative sévère ou l'instabilité traumatique.

### Exigences techniques :

Biocompatibilité : Taux d'intégration osseuse  $> 95 \% \pm 2 \%$  (temps de fusion 6-12 mois  $\pm 1$  mois).

Propriétés mécaniques : Résistance à l'usure ( $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), résistance à la fatigue ( $> 10^6 \text{ fois} \pm 10^4 \text{ fois}$ ) et résistance à la pression locale ( $> 1000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ ).

Ingénierie de surface : procédé SPS ( $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) combiné à un nano-revêtement Ag ( $2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , libération d'Ag $^+$   $< 0,01 \mu\text{g} / \text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g} / \text{cm}^2$ ) pour améliorer les propriétés antibactériennes ( $> 90\% \pm 2\%$ ) et la biocompatibilité.

Durée de vie :  $> 10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ .

**Scénario d'application :** Convient aux patients âgés de 30 à 60 ans souffrant de maladies articulaires, telles que l'ankylose du poignet ou l'instabilité de la cheville.

### Application du carbure cémenté dans les implants dentaires

Les implants dentaires en carbure sont utilisés pour réparer la perte d'une seule dent, la perte de plusieurs dents ou l'édentement complet, en remplaçant les racines des dents naturelles pour soutenir les couronnes, les ponts implantaires ou les prothèses complètes.

### Exigences techniques :

Précision mécanique : L'écart d'usinage  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$  (jeu de filetage  $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ) assure un ajustement étroit avec l'os alvéolaire.

Stabilité chimique : Résistance à la corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , résistant à l'acidité et aux métabolites bactériens dans la salive orale (pH 5-7).

Biocompatibilité : Viabilité cellulaire  $> 95 \% \pm 2 \%$  (test ostéoblaste et fibroblaste), antibactérien  $> 90 \% \pm 2 \%$  (par libération d'Ag $^+$   $< 0,01 \mu\text{g} / \text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g} / \text{cm}^2$  inhibe les pathogènes parodontaux). le procédé SPS ( $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) contrôle la porosité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$  (taille des pores de surface

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

poreuse 50-200  $\mu\text{m} \pm 20 \mu\text{m}$  ) pour favoriser la croissance osseuse.

Durée de vie :  $>10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ , soumis à des charges de mastication ( $>500 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ ).

**Scénario d'application** : Convient aux personnes âgées de 30 à 60 ans ayant des dents manquantes, comme la perte d'une seule dent due à une parodontite ou à un édentement complet chez les personnes âgées.

### Application du carbure cémenté dans les implants cardiovasculaires

Les stents cardiovasculaires en carbure sont utilisés pour traiter les maladies coronariennes athéroscléreuses ou l'infarctus aigu du myocarde et pour soutenir la lumière lors d'une intervention coronarienne percutanée (ICP).

#### Exigences techniques :

Stabilité chimique : Résistance à la corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$  (empêchant la libération d'ions Co ou W  $< 0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), testée dans le sang à pH  $7,4 \pm 0,2$ ,  $37^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ .

Biocompatibilité : Viabilité cellulaire  $> 95 \% \pm 2 \%$ , faible risque thrombotique (IL-6  $< 10 \text{ pg}/\text{mL} \pm 1 \text{ pg}/\text{mL}$ ).

Ingénierie de surface : le dopage TaC ( $0,5\%-2\% \pm 0,1\%$ ) améliore la résistance à la corrosion ( $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ ), le revêtement PVD TiN ( $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) améliore le taux d'intégration de la paroi vasculaire ( $>95\% \pm 2\%$ ).

Durée de vie :  $> 10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ , épaisseur de la paroi du stent  $0,08-0,12 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ .

**Scénario d'application** : Convient aux patients atteints de maladies cardiovasculaires âgés de 40 à 70 ans, avec un diamètre de stent de 2 à 4 mm, pour le traitement des lésions des artères coronaires avec sténose  $> 70 \%$ .

### Application du carbure cémenté dans les implants neurochirurgicaux

Les plaques de réparation du crâne en carbure sont utilisées pour la reconstruction de défauts crâniens traumatiques, de résection tumorale ou de défauts congénitaux.

#### Exigences techniques :

Biocompatibilité : Viabilité cellulaire  $> 95 \% \pm 2 \%$ , évitant l'inflammation du tissu cérébral ou la cicatrisation gliale.

Stabilité thermique : Le faible coefficient de dilatation thermique ( $< 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) correspond au crâne ( $7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), le dopage TiC ( $2\%-5\% \pm 0,5\%$ ) améliore la stabilité à haute température ( $> 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ).

Stabilité chimique : Résistance à la corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , résistance aux électrolytes du liquide céphalo-rachidien.

Optimisation de surface : revêtement PVD (ex. TiN,  $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) avec rugosité contrôlée ( $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) pour réduire l'adhérence des tissus.

Durée de vie :  $>10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$ , prend en charge la personnalisation de l'impression 3D (épaisseur  $0,5-2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ).

**Scénario d'application** : Convient aux patients âgés de 10 à 70 ans souffrant de blessures au crâne, telles que des défauts du crâne causés par des accidents de voiture.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Application du carbure cimenté dans les outils chirurgicaux

Une autre application importante du carbure cimenté dans le domaine médical est la fabrication d'outils chirurgicaux haute performance, notamment des forets et scies à os, des outils de coupe, des instruments chirurgicaux mini-invasifs (tels que les ciseaux endoscopiques), des électrodes neurochirurgicales et des couteaux à sculpter dentaires. Ces outils sont largement utilisés dans de nombreux domaines tels que l'orthopédie, la neurochirurgie, la dentisterie et la chirurgie générale, répondant à des besoins variés, de la fixation des fractures à la chirurgie mini-invasive. Grâce à son excellente dureté, sa résistance à l'usure et à la fatigue, ainsi qu'à son potentiel antibactérien, le carbure cimenté est devenu une alternative idéale aux outils traditionnels en acier inoxydable (nuance 304, HV 200-400  $\pm$  20) ou en alliage de titane (Ti-6Al-4V, HV 300-350  $\pm$  20), notamment pour les interventions chirurgicales complexes exigeant une haute précision, une longue durée de vie et des propriétés antibactériennes. Les paragraphes suivants détaillent ses caractéristiques techniques, son procédé de fabrication, ses fondements scientifiques en matière de matériaux, ses applications et ses futures orientations de recherche.

## Exigences techniques et caractéristiques de performance des outils chirurgicaux en carbure cimenté

Les outils chirurgicaux en carbure doivent répondre aux normes techniques rigoureuses suivantes pour garantir qu'ils fonctionnent bien dans des environnements médicaux à haute intensité et haute fréquence et qu'ils répondent aux exigences de l'environnement physiologique humain :

**Dureté élevée :** La plage de dureté est HV 1800-2000  $\pm$  30, obtenue par le système WC-Co (teneur en Co 6%-8%  $\pm$  1%), ce qui est proche de la dureté du diamant (HV 7000-8000  $\pm$  500), nettement meilleure que l'acier inoxydable ou l'alliage de titane, et peut couper efficacement l'os cortical (dureté HV 500-700  $\pm$  50) ou les tissus durs (comme l'émail, HV 300-400  $\pm$  20).

**Haute précision :** l'écart de traitement est contrôlé à  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , garantissant une précision au niveau du micron dans les opérations chirurgicales, telles que le positionnement d'électrodes neurochirurgicales dans le tissu cérébral (erreur  $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) ou la gravure fine de couteaux de sculpture dentaire (profondeur de coupe  $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ).

**Résistance à la fatigue :** La durée de vie en fatigue dépasse  $10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois, optimisée par des nano-grains ( $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) et une structure multiphasée (particules de WC intégrées dans la phase Co), adaptée à une utilisation répétée à haute fréquence, comme le fonctionnement à long terme de forets à os sous rotation à grande vitesse ( $> 1000 \text{ tr/min}$ , couple  $> 0,5 \text{ N}\cdot\text{m} \pm 0,05 \text{ N}\cdot\text{m}$ ), limite de fatigue  $> 1000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ .

**Propriété antibactérienne :** Taux d'inhibition bactérienne  $> 90 \% \pm 2 \%$ , par application en surface d'un revêtement nano Ag (épaisseur  $2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , libération d' $\text{Ag}^+ < 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) ou d'un revêtement TiN inhibe la croissance de Staphylococcus aureus et d'Escherichia coli, réduisant le risque d'infection postopératoire ( $< 1 \% \pm 0,5 \%$ ), conformément aux normes de test antimicrobien ISO 22196.

**Tranchant :** Force de coupe  $< 0,5 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$ , la rugosité des bords ( $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) est

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contrôlée par polissage mécano-chimique (CMP) pour garantir de faibles dommages aux tissus mous (module d'élasticité  $0,1-1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$ ) pendant la coupe, et la douceur de l'incision  $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .

Gestion thermique : Conductivité thermique  $> 120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (bien supérieure à l'acier inoxydable  $16 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), résistance thermique réduite par l'optimisation du grain et le revêtement PVD ( $< 0,1 \text{ K}\cdot\text{cm}^2 / \text{W} \pm 0,01 \text{ K}\cdot\text{cm}^2 / \text{W}$ ), à  $50 \text{ W/cm}^2 \pm 5 \text{ W/cm}^2$  Uniformité de la température de surface sous charge  $< 5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$  pour éviter les dommages thermiques aux tissus ( $> 43^\circ\text{C}$  peut provoquer une dénaturation des protéines).

## Types et applications des instruments médico-chirurgicaux en carbure cémenté

### Foret à os en carbure

Application : Pour la fixation de fractures ou la pose d'implants orthopédiques, perçage dans l'os cortical (épaisseur  $2-5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ ) ou l'os spongieux (porosité  $50\%-90\% \pm 5\%$ ) à grande vitesse de rotation ( $> 1000 \text{ tr/min}$ , couple  $> 0,5 \text{ N}\cdot\text{m} \pm 0,05 \text{ N}\cdot\text{m}$ ).

Caractéristiques : formule WC-6Co, dureté HV  $1850 \pm 30$ , diamètre de foret  $1,5-6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , précision d'usinage  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , revêtement antibactérien (tel que Ag, épaisseur  $2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) réduit efficacement le risque d'ostéomyélite (taux d'infection  $< 1\% \pm 0,5\%$ ) et de dommages thermiques.

Scénario : Forage et fixation de tiges fémorales en chirurgie de remplacement de la hanche ou pose de vis pédiculaires en chirurgie rachidienne (profondeur de filetage  $30-40 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ).

### Scie à os en carbure

Application : Pour la résection ou le remodelage osseux, comme l'ostéotomie (vitesse de coupe  $1-2 \text{ mm/s} \pm 0,1 \text{ mm/s}$ ) ou la résection tumorale (volume de résection  $> 10 \text{ cm}^3 \pm 1 \text{ cm}^3$ ).

Caractéristiques : Conception en dents de scie, force de coupe  $< 0,5 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$ , résistance à l'usure  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ , revêtement PVD ZrN ( $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) améliore la durabilité ( $> 500$  utilisations  $\pm 50$  fois), adapté à la coupe de tissu osseux avec une dureté HV  $600 \pm 50$ .

Scénario : Remodelage du plateau tibial lors d'un remplacement du genou ou d'une amputation d'urgence lors d'une chirurgie traumatologique (temps de coupe  $< 5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$ ).

### Outils de coupe en carbure

Application : Appliqué à la résection des tissus mous ou à la mise en forme délicate, comme la résection d'une tumeur cérébrale (profondeur de coupe  $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) ou l'échantillonnage de tissus (volume d'échantillon  $0,5-1 \text{ cm}^3 \pm 0,1 \text{ cm}^3$ ).

Caractéristiques : Tranchant du tranchant  $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ , résistance à la fatigue  $> 10^6$  fois  $\pm 10^4$  fois, taux antibactérien du revêtement Ag  $> 90\% \pm 2\%$  (taux d'inhibition contre le SARM  $> 95\% \pm 1\%$ ), force de coupe  $< 0,5 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$ .

Scénario : Résection d'un gliome par neurochirurgie ou préparation d'un lambeau de chirurgie plastique (épaisseur  $0,2-0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Instruments chirurgicaux mini-invasifs en carbure (tels que les ciseaux endoscopiques)**

Application : Pour la séparation et la résection des tissus (par exemple, la section du foie ou la coupe des ligaments) lors d'une chirurgie laparoscopique ou arthroscopique.

Caractéristiques : Longueur  $20-40\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$ , précision de la pointe  $< 0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ , résistance à la corrosion  $< 0,01\text{ mm/an} \pm 0,001\text{ mm/an}$  (testé dans une solution de NaCl à 0,9 %), le revêtement TiN réduit la friction ( $< 0,2 \pm 0,05$ ), convient pour un fonctionnement à une température corporelle de  $37\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  (stabilité thermique  $> 200\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ ).

Scénario : Parage arthroscopique du ménisque (longueur de coupe  $10-20\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ ) ou appendicectomie laparoscopique (temps opératoire  $< 15\text{ min} \pm 1\text{ min}$ ).

### **Électrodes de neurochirurgie en carbure**

Application : Pour la stimulation cérébrale profonde (SCP) pour traiter la maladie de Parkinson ou l'épilepsie, ou l'enregistrement du signal neuronal (taux d'échantillonnage  $> 1\text{ kHz} \pm 0,1\text{ kHz}$ ).

Caractéristiques : Diamètre  $0,5-1\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$ , conductivité  $> 100\text{ S/cm}$  (résistivité  $< 0,01\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,001\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ ), biocompatibilité (viabilité cellulaire  $> 95\% \pm 2\%$ , attache neuronale  $> 90\% \pm 2\%$ ), rugosité de surface  $R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ , réduit l'inflammation des tissus cérébraux (IL-6  $< 10\text{ pg/mL} \pm 1\text{ pg/mL}$ ).

Scénario : Implantation de DBS chez des patients atteints de la maladie de Parkinson (profondeur d'électrode  $5-10\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$ ) ou localisation du foyer épileptique (résolution spatiale  $< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ ).

### **Couteau à sculpter dentaire en carbure**

Application : Pour les restaurations dentaires (telles que les obturations en résine) ou le façonnage des tissus péri-implantaires (profondeur de coupe  $< 0,2\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$ ).

Caractéristiques : précision du tranchant  $< 0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ , force de coupe  $< 0,5\text{ N} \pm 0,05\text{ N}$ , propriété antibactérienne du revêtement Ag  $> 90\% \pm 2\%$  (inhibe le pathogène parodontal *Porphyromonas gingivalis*), résistance à la charge de mastication ( $> 500\text{ N} \pm 10\text{ N}$ ).

Scénario : Mise en forme des marges de la couronne ou préparation du lit implantaire (diamètre  $3-5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ ).

### **Procédé de fabrication et traitement de surface**

**Procédé de préparation** : Les outils chirurgicaux en carbure sont généralement fabriqués par des procédés SPS ( $1400\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ ,  $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$ ) ou HIP ( $1300\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ ,  $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ) pour garantir une granulométrie de  $0,5-1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$  et une porosité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$  (micro-défauts  $< 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ ). La fabrication additive (Selective Laser Melting, SLM, épaisseur de couche  $20-50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ , puissance laser  $200-400\text{ W} \pm 10\text{ W}$ ) permet la personnalisation de géométries complexes, telles que la conception incurvée d'instruments mini-invasifs ou la structure microporeuse d'électrodes.

**Traitement de surface** : Un revêtement TiN, ZrN ou Ag (épaisseur  $2-15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ ) est appliqué par PVD ( $400-600\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ , taux de dépôt  $0,1-0,5\text{ }\mu\text{m/min} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m/min}$ ) ou CVD ( $800-1000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ , concentration de vapeur  $10-20\text{ vol}\% \pm 1\text{ vol}\%$ ), et la rugosité est contrôlée ( $R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ ) par polissage mécano-chimique (CMP, pression  $5-10\text{ kPa} \pm 0,5\text{ kPa}$ ) pour

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimiser la netteté et les propriétés antibactériennes. Le nettoyage au plasma ( $500\text{ W} \pm 50\text{ W}$ ,  $5\text{-}10\text{ min} \pm 0,5\text{ min}$ , atmosphère  $\text{Ar}/\text{O}_2$ ) élimine la couche d'oxyde ( $<0,01\text{ }\mu\text{m} \pm 0,001\text{ }\mu\text{m}$ ) et améliore la propreté de la surface et la force d'adhérence ( $>50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ).

### Bases de la science des matériaux

Microstructure : particules de WC (dureté  $\text{HV } 2200 \pm 50$ ) noyées dans la phase Co (module de ténacité  $200\text{-}300\text{ GPa} \pm 20\text{ GPa}$ ), formant un effet de renforcement composite, énergie aux joints de grains  $<0,5\text{ J/m}^2 \pm 0,05\text{ J/m}^2$  Résistance accrue aux fissures.

Structure électronique : Le centre de la bande d du WC est proche du niveau de Fermi ( $-1,5\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$ ), similaire au métal noble Pt, ce qui lui confère une inertie biologique potentielle.

Chimie de surface : la libération d' $\text{Ag}^+$  permet d'obtenir des propriétés antibactériennes par échange d'ions (coefficient de diffusion  $10^{-10}\text{ m}^2/\text{s} \pm 10^{-11}\text{ m}^2/\text{s}$ ), et le revêtement TiN forme des liaisons Ti-O (énergie de liaison  $460\text{ kJ/mol} \pm 10\text{ kJ/mol}$ ) pour améliorer la résistance à la corrosion.

### Scénarios d'application et avantages cliniques

Chirurgie orthopédique : Les forets et scies à os réduisent le temps de coupe ( $<5\text{ min} \pm 0,5\text{ min/temps}$ ), améliorent l'efficacité chirurgicale ( $>20\% \pm 2\%$ ) et réduisent les lésions thermiques peropératoires ( $<40\text{ }^\circ\text{C} \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ ) lors du remplacement de la hanche et du genou et de la correction de la colonne vertébrale.

Neurochirurgie : les électrodes et les instruments mini-invasifs favorisent la précision de la DBS ( $<0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ , résolution spatiale  $<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ ) et réduisent le risque de lésion nerveuse ( $<1\% \pm 0,5\%$ ).

3-6 mois  $\pm 0,5$  mois) dans la pose d'implants.

Avantages : Par rapport aux outils traditionnels, les outils en carbure ont une durée de vie 2 à 3 fois plus longue ( $>500\text{ utilisations} \pm 50\text{ fois}$ ), les propriétés antibactériennes réduisent les taux d'infection ( $<1\% \pm 0,5\%$ ) et conviennent aux chirurgies à haut risque (comme la réparation de fractures ouvertes).

### Orientations de recherche futures

Nano-amélioration : Développement de nano-arêtes  $<10\text{ nm}$  (surface  $>200\text{ m}^2/\text{g} \pm 20\text{ m}^2/\text{g}$ ), améliorant l'efficacité de coupe ( $>30\% \pm 2\%$ ) et la durabilité ( $>1000\text{ fois} \pm 50\text{ fois}$ ).

Intelligent : Le capteur de température intégré (précision  $<0,1\text{ }^\circ\text{C} \pm 0,01\text{ }^\circ\text{C}$ , temps de réponse  $<0,1\text{ s} \pm 0,01\text{ s}$ ) surveille les effets thermiques et optimise la sécurité chirurgicale.

Optimisation de la biocompatibilité : Réduire la teneur en Co ( $<5\% \pm 0,5\%$ ) et la remplacer par du Ni (seuil de toxicité  $<0,1\text{ mg/L} \pm 0,01\text{ mg/L}$ ) ou du Cr (antioxydant  $<0,01\% \pm 0,001\%$ ) pour respecter les normes environnementales RoHS et REACH.

de couche  $10\text{-}30\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ , précision d'impression  $<0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ ) pour produire des outils personnalisés s'adaptant à des structures anatomiques complexes (telles que les trajets d'électrodes cérébrales profondes).

Durabilité : Développement de procédés bas carbone (réduction de la consommation énergétique  $>10\% \pm 2\%$ , émissions de  $\text{CO}_2$   $<5\text{ kg/pièce} \pm 0,5\text{ kg/pièce}$ ), alimentés par l'énergie solaire ou éolienne.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Autres applications potentielles du carbure cémenté dans le domaine médical

### Échafaudages d'ingénierie tissulaire

La structure poreuse du carbure cémenté (porosité  $30\%-50\% \pm 5\%$ , taille des pores  $100-500 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$ ) peut être utilisée comme échafaudage pour l'ingénierie tissulaire osseuse, combinée à la protéine morphogénétique osseuse (BMP-2, concentration  $10-50 \mu\text{g}/\text{mL} \pm 5 \mu\text{g}/\text{mL}$ ) ou au facteur de croissance endothéliale vasculaire (VEGF) pour favoriser la régénération osseuse (nouvelle masse osseuse  $> 70\% \pm 5\%$ ).

### Support de libération de médicament

Après modification de surface, des antibiotiques (tels que la vancomycine, taux de libération de  $0,1$  à  $0,5 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,05 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ ) ou des médicaments anti-inflammatoires (tels que la dexaméthasone, période de libération  $> 7 \text{ j} \pm 1 \text{ j}$ ) peuvent être chargés pour un traitement à libération prolongée de l'infection ou de l'inflammation (taux d'inhibition  $> 90\% \pm 2\%$ ).

## Procédé de fabrication et traitement de surface du carbure cémenté

**Procédé** : SPS et HIP garantissent une densité élevée (porosité  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ , densité  $> 99\% \pm 0,5\%$ ), la fabrication additive (SLM, épaisseur de couche  $20-50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , vitesse de numérisation  $500-1000 \text{ mm/s} \pm 50 \text{ mm/s}$ ) prend en charge la conception personnalisée.

**Revêtement** : PVD/CVD appliqué TiN, Revêtement ZrN ou Ag (épaisseur  $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , taux de dépôt  $0,1-0,5 \mu\text{m}/\text{min} \pm 0,05 \mu\text{m}/\text{min}$ ) avec biocompatibilité optimisée (taux d'attachement cellulaire  $> 95\% \pm 2\%$ ) et propriétés antibactériennes (taux d'inhibition  $> 90\% \pm 2\%$ ).

## Orientation future du développement des applications médicales du carbure cémenté

**Nano- optimisation** : Développement de nanoparticules  $< 10 \text{ nm}$  (surface  $> 200 \text{ m}^2/\text{g} \pm 20 \text{ m}^2/\text{g}$ ) pour améliorer l'activité de surface des implants et outils.

**Biocompatibilité améliorée** : Teneur en Co réduite ( $< 5\% \pm 0,5\%$ ), remplacée par Ni ou Cr, libération d'ions de métaux lourds réduite ( $< 0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ).

**Intelligent** : des capteurs intégrés surveillent la contrainte de l'implant ( $< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) ou la température de l'outil ( $< 40^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ) pour un retour d'information en temps réel.

**Durabilité** : Développement de procédés bas carbone (réduction de la consommation énergétique  $> 10\% \pm 2\%$ , empreinte carbone  $< 5 \text{ kg CO}_2 \text{ e/pièce} \pm 0,5 \text{ kg CO}_2 \text{ e/pièce}$ ), alimentés par l'énergie solaire ou éolienne.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Types, caractéristiques, performances et problèmes de l'impression 3D de matériaux en carbure cimenté

Technologie d'impression 3D (Additif) Manufacturing) propose une méthode de fabrication révolutionnaire pour le traitement du carbure cimenté (avec un système carbure de tungstène-cobalt, WC-Co, comme noyau), dépassant les limites des procédés traditionnels de métallurgie des poudres (tels que le frittage, le pressage isostatique à chaud et le pressage-frittage à froid). Grâce à des procédés avancés tels que la fusion sélective par laser (SLM), la fusion par faisceau d'électrons (EBM), le jet de liant (BJ) ou le dépôt direct d'énergie (DED), les matériaux en carbure cimenté peuvent atteindre des géométries complexes, une haute précision et une production sur mesure. Français Ces technologies utilisent des faisceaux à haute énergie (tels qu'une puissance laser de 200 à 1 000 W  $\pm$  20 W ou un courant de faisceau d'électrons de 10 à 50 mA  $\pm$  1 mA) pour fondre ou combiner la poudre métallique couche par couche, et sont largement utilisées dans les industries de haute technologie telles que la médecine (comme la réparation du crâne, le remplacement de la hanche et les implants dentaires), l'aérospatiale (aubes de turbine, structures légères et revêtements de barrière thermique), la fabrication de moules (outils d'emboutissage de précision, outils d'emboutissage et outils de découpe à haute résistance à l'usure) et l'énergie (composants de turbines à gaz à haute température et structures de réacteurs nucléaires). Ce qui suit détaille l'état actuel, les défis et l'orientation future du développement de l'impression 3D de carbure cimenté du point de vue des types de matériaux, des caractéristiques, des performances et des problèmes existants, combinés aux dernières données d'application de la science des matériaux et de l'ingénierie pour améliorer les connaissances et le professionnalisme.

### 1. Types de matériaux en carbure pour l'impression 3D

Les matériaux en carbure cimenté pour l'impression 3D reposent principalement sur le système carbure-liant. Leur diversité et leur constante évolution dépendent des exigences des applications, des procédés d'impression et de l'adaptabilité environnementale. Parmi ces matériaux, on peut citer :

#### Carbure cimenté à base de carbure de tungstène-cobalt (WC-Co)

**Composition :** Carbure de tungstène (WC) comme phase dure, cobalt (Co) comme phase liante, les ratios typiques incluent WC-6%Co, WC-10%Co ou WC-15%Co, plage de granulométrie de poudre 10-50  $\mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ .

**Application :** Largement utilisé dans les implants médicaux (tels que les prothèses de hanche et les genouillères, qui doivent répondre aux normes ASTM F1537), les outils de coupe (tels que les outils de tournage, les fraises et les forets, qui répondent aux exigences ISO 513) et les moules de revêtement résistants à l'usure (tels que les matrices d'emboutissage et les matrices d'emboutissage).

**Caractéristiques :** Dureté élevée (HV 1800-2000  $\pm$  30), ténacité modérée (ténacité à la rupture 10-15 MPa $\cdot\text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ), conductivité thermique  $\sim 100\text{-}150 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , coefficient de dilatation thermique  $\sim 5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , adapté aux environnements à charge élevée et à température moyenne et élevée ( $< 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Carbure cémenté à base de carbure de tungstène-nickel/chrome (WC-Ni/Cr)

**Composition :** Le nickel (Ni) ou le chrome (Cr) remplacent partiellement ou totalement le cobalt (Co) afin de réduire la toxicité biologique ou d'améliorer la résistance à la corrosion. Les formulations courantes incluent WC-8 % Ni, WC-5 % Ni-3 % Cr ou WC-10 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>. La granulométrie de la poudre est de 15 à 45 µm ± 5 µm .

**Application :** Convient pour les stents cardiovasculaires (conformes aux normes de biocompatibilité ISO 10993-1), les gaines de câbles pour les environnements marins (tels que les câbles de communication sous-marins) et les matrices de tréfilage résistantes à la corrosion (telles que le tréfilage de fils en alliage de cuivre).

**Caractéristiques :** La résistance à la corrosion est meilleure que celle du WC-Co (taux de corrosion < 0,008 mm/an ± 0,001 mm/an, testé dans une solution de NaCl à 3,5 %), la résistance à l'oxydation est < 0,01 % ± 0,001 % de perte de masse à 600 °C ± 20 °C, conductivité ~ 10<sup>-5</sup> Ω·cm ± 10<sup>-6</sup> Ω·cm , convient aux matériaux de contact électrique.

### composite carbure de tungstène-carbure de titane/carbure de tantale (WC -TiC / TaC )

**Composition :** Les performances à haute température et la résistance à l'oxydation sont améliorées par le dopage du carbure de titane ( TiC ) ou du carbure de tantale ( TaC ), tels que WC-5%TiC-5% Co, WC-3%TaC-7%Co ou WC-2%TiC-2%TaC-6%Co, avec une granulométrie de poudre de 10-40 µm ± 5 µm .

**Application :** Convient aux outils chirurgicaux à haute température (tels que les forets orthopédiques et les lames de coupe, qui doivent résister à 800°C ± 20°C), aux pièces d'aviation (telles que les buses de moteur et les chemises de chambre de combustion) et aux moules à haute température (tels que les matrices de forgeage à chaud).

**Caractéristiques :** Résistance à haute température (>800°C ± 20°C, point de fusion proche de 2870°C ± 50°C), excellente stabilité thermique (coefficient de dilatation thermique ~4,8×10<sup>-6</sup> /°C ± 0,5×10<sup>-6</sup> /°C), résistance à la fatigue thermique >5000 fois ± 500 fois, dureté HV 1900-2200 ± 30.

### Carbure cémenté à haute entropie (WC à base de HEA)

**Composition :** Combine des alliages à haute entropie (tels que CoCrFeNiTi , TiZrHfNbTa ) avec du carbure de tungstène (WC) pour former des matériaux composites multi-éléments, tels que WC-10% ( CoCrFeNi ), WC-15% ( TiZrHfNb ) ou WC-20% ( CrFeNiMo ) , avec une granulométrie de poudre de 20-60 µm ± 5 µm .

**Applications :** Convient aux dispositifs médicaux utilisés dans des environnements extrêmes (tels que les moules de radiothérapie et les implants de traitement du cancer), aux composants d'équipements en haute mer (tels que les vannes sous-marines) et aux structures aérospatiales (telles que les panneaux de contrôle thermique des satellites).

**Caractéristiques :** Effet de stabilisation d'entropie (entropie de configuration > 1,5 R ± 0,1 R, R est la constante des gaz 8,314 J/ mol· K ) améliore la stabilité de phase, dureté HV 1700-1900 ± 30, résistance à la corrosion < 0,005 mm/an ± 0,001 mm/an (en solution acide), résistance aux radiations < 0,01 Gy/h ± 0,001 Gy/h.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Nanocomposite carbure de tungstène-cobalt (WC-Co)

**Composition :** Poudre de carbure de tungstène (WC) nanométrique (granulométrie  $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ) mélangée à du cobalt (Co), telle que WC-5%Co (nanométrique) ou WC-8%Co (nano-renforcé), avec une surface spécifique de poudre  $>50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ .

**Application :** Convient aux micro-implants de haute précision (tels que les implants dentaires et les micro-capteurs), aux connecteurs microélectroniques (tels que les cadres de connexion de semi-conducteurs) et aux matrices de tréfilage de précision (telles que les matrices de fil de cuivre ultra-fin).

**Caractéristiques :** Surface spécifique élevée ( $>50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ), dureté HV  $1900-2100 \pm 30$ , granulométrie  $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ , homogénéité microstructurale améliorée (densité aux joints de grains  $>10^{15} \text{ m}^{-2} \pm 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ), résistance à la fatigue  $>10^6 \text{ cycles} \pm 10^4 \text{ cycles}$ .

### Carbure cémenté composite carbure de tungstène-carbure de bore (WC-B4C)

**Composition :** Le carbure de bore (B4C) est dopé pour améliorer la résistance à l'usure et aux chocs, comme le WC-10%Co-5%B4C ou le WC-8%Co-3%B4C, granulométrie de poudre  $15-50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ .

**Application :** Convient aux matrices d'emboutissage robustes (telles que le moulage de pièces automobiles), aux matrices d'étirage à grande vitesse (telles que le tréfilage) et aux revêtements résistants à l'usure (tels que les surfaces de travail des rectifieuses).

**Caractéristiques :** Dureté HV  $2000-2200 \pm 30$ , résistance à l'usure  $<0,03 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ , résistance à la compression  $>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , résistance aux hautes températures  $>900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ .

### Carbure composite carbure de tungstène-nitrure de titane (WC- TiN )

**Composition :** Dopé au nitrure de titane ( TiN ) pour améliorer la dureté de surface et la résistance à l'oxydation, tel que WC-5%TiN-5%Co ou WC-3%TiN-7%Co, granulométrie de poudre  $10-40 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ .

**Application :** Convient aux outils de coupe résistants à l'usure (tels que les plaquettes en carbure), aux revêtements aéronautiques (tels que les couches de protection anti-oxydation) et aux emballages électroniques haute température.

**Caractéristiques :** Dureté HV  $1900-2300 \pm 30$ , résistance à l'oxydation à  $1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$  perte de masse  $<0,01\% \pm 0,001\%$ , résistivité  $\sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ .

## 2. Caractéristiques des matériaux en carbure cémenté imprimés en 3D

Les propriétés uniques des matériaux en carbure imprimés en 3D résultent du dépôt couche par couche de la fabrication additive, des mécanismes de fusion ou de liaison localisés, combinés à un contrôle avancé des processus :

### Conception de formes géométriques complexes

La technologie de fusion sélective par laser (SLM) ou de fusion par faisceau d'électrons (EBM) peut être utilisée pour fabriquer des structures poreuses internes (porosité  $30\%-50\% \pm 5\%$ , taille des

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pores  $100\text{-}500\text{ }\mu\text{m} \pm 50\text{ }\mu\text{m}$  ) ou des microcanaux (diamètre  $0,1\text{-}0,5\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$ ) pour répondre aux exigences de croissance osseuse des implants médicaux (tels que les échafaudages osseux artificiels, favorisant le taux de fixation des cellules osseuses  $> 90\% \pm 2\%$ ), des pièces d'aviation légères (telles que les structures en nid d'abeille, réduction de poids de  $20\%\text{-}30\% \pm 2\%$ ) et des canaux de refroidissement dans les moules.

#### **Haute précision et personnalisation**

La précision d'impression peut atteindre  $20\text{-}50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$  (épaisseur de couche), prenant en charge les dispositifs médicaux personnalisés (tels que les plaques de réparation du crâne, les prothèses personnalisées, avec une erreur de  $< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ ), les pièces complexes dans l'aérospatiale (telles que les aubes de turbine, avec une rugosité de surface de  $R_a < 5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$  ) et les microstructures dans les emballages électroniques.

#### **Gradient de matière et fonctionnalisation**

Grâce à l'impression multi-matériaux ou au dépôt en gradient, une porosité en gradient (de  $10\%$  à  $60\% \pm 5\%$  ) ou un revêtement de surface (tel que TiN ,  $5\text{-}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$  ; CrN , épaisseur  $10\text{-}20\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$  ) peuvent être obtenus, améliorant la biocompatibilité (viabilité cellulaire  $> 95\% \pm 2\%$ ), les propriétés mécaniques (résistance à la traction  $> 300\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$ ) et la résistance à la corrosion ( $< 0,005\text{ mm/an} \pm 0,001\text{ mm/an}$ ), ce qui le rend adapté aux implants fonctionnels et aux moules résistants aux environnements extrêmes.

#### **Réduction des déchets et efficacité des ressources**

Par rapport à la découpe traditionnelle, l'impression 3D réduit les déchets de matière ( $< 5\% \pm 1\%$ ) et offre un taux de récupération de poudre supérieur à  $90\% \pm 2\%$ , ce qui s'inscrit dans la tendance de la fabrication durable. Elle présente des avantages économiques, notamment pour la production de composants aéronautiques haut de gamme (les substituts aux alliages de titane réduisent les coûts de  $15\text{ à }20\% \pm 2\%$ ) et de dispositifs médicaux.

#### **Prototypage rapide et itération**

Le cycle d'impression est court ( $2\text{ à }10\text{ h} \pm 1\text{ h}$  pour une pièce unique, selon la complexité) , ce qui facilite la vérification de la conception et l'ajustement des lots. Il est adapté à la fabrication de moules pour les marchés à réponse rapide (le temps d'itération du moule est réduit de  $50\% \pm 5\%$ ), aux besoins médicaux d'urgence (comme les prothèses personnalisées) et aux tests de prototypes aéronautiques.

#### **Contrôle structurel multi-échelle**

En ajustant les paramètres d'impression (tels que l'épaisseur de couche  $20\text{-}100\text{ }\mu\text{m} \pm 5\text{ }\mu\text{m}$  , la stratégie de numérisation), un contrôle structurel de l'échelle nanométrique (grain  $< 0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$  ) à l'échelle macroscopique (taille du composant  $100\text{-}500\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ ) peut être obtenu pour répondre aux besoins d' application dans de multiples domaines.

### **3. Performances des matériaux en carbure cémenté imprimés en 3D**

Les performances du carbure cémenté imprimé en 3D varient en fonction du procédé (par exemple SLM, EBM), du rapport de matériau et du post-traitement, mais présentent généralement les caractéristiques suivantes étayées par des données scientifiques :

#### **Propriétés mécaniques**

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Dureté : HV 1600-1900  $\pm$  30 (légèrement inférieure à celle du matériau fritté traditionnel HV 1800-2000  $\pm$  30). En raison de la porosité microscopique ( $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ ) et de la densité incomplète (densité 95 %-98 %  $\pm 1 \%$ ), un post-traitement HIP est nécessaire pour atteindre HV 1900  $\pm$  20.

Résistance à la compression :  $> 3\,500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , convient aux implants à forte charge (tels que les prothèses de hanche, charges  $> 2\,000 \text{ N} \pm 100 \text{ N}$ ) et aux moules (tels que les matrices d'emboutissage, pressions  $> 3\,000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ).

Ténacité à la rupture :  $8-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , inférieure aux matériaux traditionnels ( $10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ), qui est associée à la porosité ( $0,5 \%-2\% \pm 0,5\%$ ) et aux défauts aux joints de grains (densité  $> 10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$ ).

#### Stabilité chimique

Résistance à la corrosion :  $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$  (dans une solution de NaCl à 0,9 %, pH 7-9), le dopage au TiC ou au TaC peut encore la réduire à  $< 0,008 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$ , adapté aux composants de l'environnement marin (tels que les supports de canalisations d'eau de mer).

Résistance à l'oxydation : la perte de masse à  $600 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  est  $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$ , à  $800 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  est  $< 0,05 \% \pm 0,005 \%$ , adaptée à la stérilisation à haute température ou aux pièces aéronautiques à haute température (telles que les buses).

#### Biocompatibilité

Viabilité cellulaire :  $> 95 \% \pm 2 \%$  (testé selon la norme ISO 10993-5, en utilisant la lignée cellulaire L929), taux antibactérien du revêtement Ag  $> 90 \% \pm 2 \%$  (contre E. coli et Staphylococcus aureus), adapté aux implants médicaux (tels que les clous orthopédiques).

Taux d'intégration osseuse :  $> 90 \% \pm 2 \%$  (favorisé par la structure poreuse, taille des pores  $200-400 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$ ), légèrement inférieur aux implants traditionnels ( $> 95 \% \pm 2 \%$ ), nécessitant une optimisation de la distribution des pores et une modification de la surface.

#### Propriétés thermiques

Conductivité thermique :  $> 100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , meilleure que l'acier inoxydable ( $16 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) et proche de 50 % de l'aluminium ( $237 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ), mais une fusion locale peut provoquer une contrainte thermique ( $< 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ), affectant l'intégrité structurelle.

Coefficient de diffusion thermique :  $> 50 \text{ mm}^2/\text{s} \pm 5 \text{ mm}^2/\text{s}$ , adapté aux applications de dissipation thermique rapide telles que l'emballage électronique (densité de flux thermique de la puce  $> 100 \text{ W/cm}^2 \pm 10 \text{ W/cm}^2$ ).

Coefficient de dilatation thermique :  $\sim 5,2 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$ , bien adapté à la puce Si ( $4,1 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \pm 0,2 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$ ) ( $< 5\% \pm 1\%$ ).

## 4. Problèmes liés à l'impression 3D de matériaux en carbure cémenté

Bien que la technologie d'impression 3D ait apporté de l'innovation au carbure cémenté, elle est toujours confrontée aux défis techniques suivants, qui nécessitent une combinaison de science des matériaux et d'analyse technique :

#### Défauts microscopiques et pores

Au cours du processus de fusion sélective par laser (SLM), des pores sphériques (diamètre  $10-50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ ) se forment en raison d'un refroidissement rapide (vitesse de refroidissement  $10^3 - 10^5 \text{ K/s} \pm 10^2 \text{ K/s}$ ) avec une porosité de  $0,5\%-2\% \pm 0,5\%$ , ce qui réduit la ténacité à la rupture ( $< 10$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MPa·m<sup>1/2</sup> ± 1 MPa·m<sup>1/2</sup>), en particulier à des vitesses de déformation élevées ( $>10^{-3} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ).

**Solution** : Optimiser les paramètres laser (puissance 200-400 W ± 10 W, vitesse de balayage 500-1000 mm/s ± 50 mm/s, taux de chevauchement 20%-30% ± 2%) ou post-traitement par pressage isostatique à chaud (HIP, 1300°C ± 10°C, 200 MPa ± 5 MPa, temps de traitement 2-4 h ± 0,1 h).

#### Composition de phase inhomogène

Les températures locales élevées ( $> 2500^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) provoquent la décomposition du carbure de tungstène (WC) pour former du W<sub>2</sub>C ou du carbone libre (teneur  $< 1\% \pm 0,1\%$ ), ce qui affecte la dureté (HV diminue de 5 à 10 % ± 1 %) et la résistance à l'usure (taux d'usure  $> 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ), en particulier dans le procédé EBM.

**Solution** : Ajustez la taille des particules de poudre (10-50 μm ± 5 μm) ou ajoutez des stabilisants (tels que le carbure de vanadium, VC, 0,1 %-0,5 % ± 0,01 % ; le carbure de niobium, NbC, 0,2 %-0,6 % ± 0,05 %) pour inhiber la transformation de phase.

#### Contraintes résiduelles et fissures

Les gradients thermiques ( $\Delta T > 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) induisent des contraintes résiduelles ( $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ , localement jusqu'à 500 MPa ± 50 MPa) qui peuvent conduire à des microfissures (longueur  $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ), notamment dans les structures complexes telles que les pièces à parois minces ou les structures en porte-à-faux.

**Solution** : Introduire un préchauffage du substrat (200-400°C ± 10°C) ou un traitement thermique de détente des contraintes (800°C ± 20°C, 1-2 h ± 0,1 h, vitesse de refroidissement  $< 5^\circ\text{C}/\text{min} \pm 1^\circ\text{C}/\text{min}$ ) combiné à un traitement d'oscillation (fréquence 50-100 Hz ± 5 Hz).

#### Rugosité de surface et exigences de post-traitement

La rugosité de surface imprimée Ra est de 5 à 15 μm ± 1 μm, ce qui nécessite un polissage mécanique ( $Ra < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) ou un traitement de revêtement, ce qui augmente le coût de fabrication ( $> 10\% \pm 2\%$ ) et affecte la douceur de surface des implants médicaux (le taux d'attachement bactérien est proportionnel à Ra,  $> 10^4 \text{ UFC}/\text{cm}^2 \pm 10^3 \text{ UFC}/\text{cm}^2$  lorsque  $Ra > 5 \mu\text{m}$ ).

**Solution** : Optimiser la stratégie d'impression (comme la numérisation en damier, le taux de chevauchement de 20 à 30 % ± 2 %, l'optimisation de la structure de support) ou développer un revêtement autolubrifiant (comme le disulfure de molybdène, MoS<sub>2</sub>, épaisseur de 1 à 5 μm ± 0,1 μm ; revêtement de graphène, épaisseur de 2 à 10 μm ± 0,2 μm).

#### Coût des matériaux et répétabilité

Les nanopoudres et les équipements haut de gamme (SLM et autres coûts d'équipement) augmentent les coûts, et la cohérence de la production de masse est médiocre (écart de performance  $> 5\% \pm 1\%$ , écart de porosité  $> 1\% \pm 0,2\%$ ), ce qui limite les applications à grande échelle.

**Solution** : Développer des précurseurs à faible coût (tels que des poudres composites WC-Co avec une granulométrie de 20-30 μm ± 2 μm) pour réduire les coûts ou établir une base de données de paramètres de processus (basée sur l'apprentissage automatique, avec une précision de prédiction de  $> 95\% \pm 2\%$ ) pour améliorer la répétabilité.

## 5. Orientation future du développement de l'impression 3D en carbure cémenté

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Optimisation des processus

Développer la fusion sélective par laser multi-laser (SLM, puissance  $> 500 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$ , nombre de faisceaux laser  $2-4 \pm 1$ ) ou la fusion par faisceau d'électrons (EBM, densité de faisceau  $> 10^4 \text{ A/m}^2 \pm 10^3 \text{ A/m}^2$ , stratégie de balayage optimisée) pour réduire la porosité ( $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ ) et les contraintes ( $< 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ), et améliorer l'intégrité structurelle (durée de vie en fatigue  $> 10^7 \text{ cycles} \pm 10^5 \text{ cycles}$ ) des composants aéronautiques tels que les aubes de turbine.

### Innovation matérielle

Explorez les carbures à haute entropie sans WC (tels que  $(\text{TiZrHfNb})\text{C}$ , dureté HV 1500-1800  $\pm 30$ , ténacité à la fracture  $12-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) ou les matériaux renforcés biocompatibles (tels que WC-Ni-Cr-Ti, taux d'intégration osseuse  $> 95 \% \pm 2 \%$ , taux antibactérien  $> 95 \% \pm 2 \%$ ) pour répondre aux besoins médicaux et environnementaux extrêmes (tels que les forêts en eaux profondes).

### Fabrication intelligente

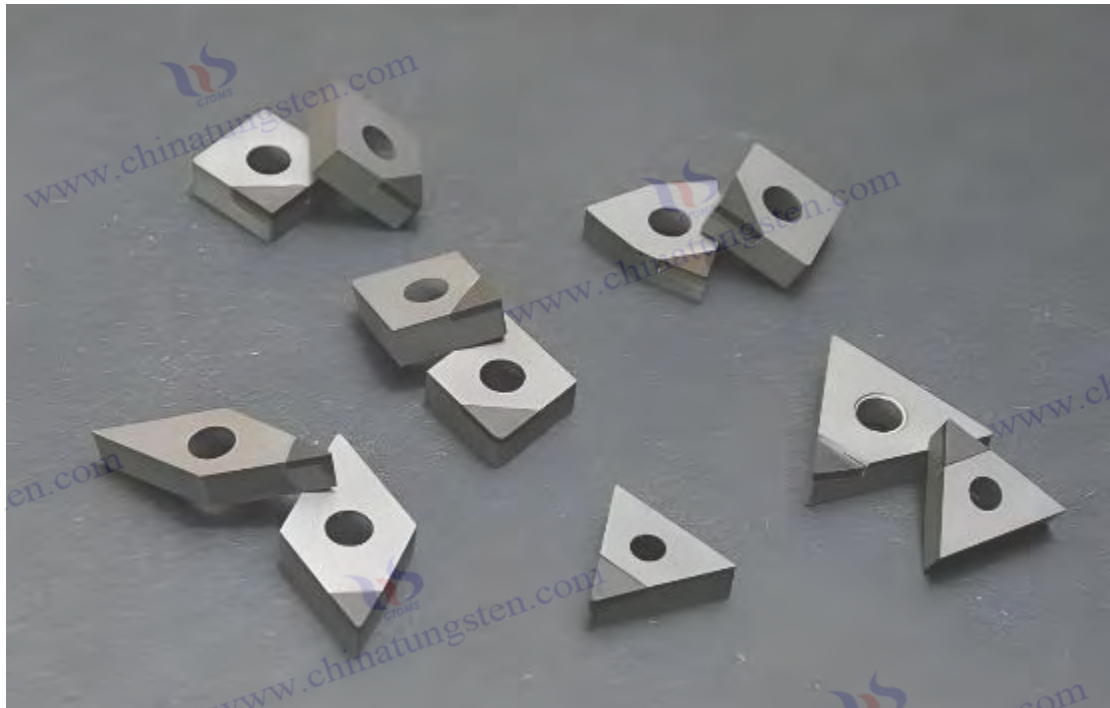
Surveillance intégrée en temps réel (précision de la température  $< 0,1^\circ\text{C} \pm 0,01^\circ\text{C}$ , détection de déformation  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , basée sur l'imagerie thermique infrarouge et l'interféromètre laser), combinée à l'intelligence artificielle pour optimiser les paramètres d'impression (contrôle adaptatif, erreur  $< 1 \% \pm 0,1 \%$ ), améliore l'efficacité de fabrication des moules (productivité augmentée de  $20 \% \text{ à } 30 \% \pm 2 \%$ ) et le contrôle qualité.

### Durabilité

L'utilisation de poudres recyclées (taux de réutilisation  $> 90 \% \pm 2 \%$ , basé sur le criblage de poudre et le re- broyage à boulets), de procédés à faible consommation d'énergie (consommation d'énergie  $< 10 \text{ kWh/kg} \pm 1 \text{ kWh/kg}$ , utilisant des sources laser à haut rendement) et de matériaux de support dégradables favorise la fabrication verte, en particulier dans les applications énergétiques (telles que les moules de pales d'éoliennes).

La technologie d'impression 3D au carbure cémenté présente un fort potentiel d'application dans les secteurs médical, aéronautique et de la fabrication de moules. Son développement futur reposera sur la coordination de l'optimisation des procédés (contrôle de la porosité  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ ), de l'innovation des matériaux (développement de nouveaux alliages à haute entropie) et de la fabrication intelligente (technologie du jumeau numérique). Son application industrielle à grande échelle est prévue d'ici 5 à 10 ans.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## Table des matières

### Partie 4 : Classification et domaines d'application du carbure cimenté

#### Chapitre 14 : Applications émergentes et multifonctionnalité du carbure cimenté

##### 14.0 Propriétés du carbure cimenté

##### 14.1 Composants électroniques et conducteurs en carbure cimenté

###### 14.1.1 Moules en alliage dur pour l'industrie électronique

- (1) Matrice de poinçonnage pour cadre en carbure de plomb
- (2) Moule d'emballage de copeaux de carbure
- (3) Matrice de poinçonnage pour circuits imprimés en carbure
- (4) Matrice d'emboutissage de micro-connecteurs en carbure
- (5) Moule d'emballage de capteur en carbure
- (6) Moule de perçage laser au carbure

###### 14.1.2 Substrat de dissipation thermique en alliage dur pour l'industrie électronique

- (1) Substrat composite de dissipation thermique en carbure de tungstène et cuivre (WC-Cu)
- (2) Substrat de dissipation thermique composite en carbure de tungstène-diamant (WC-Diamond)

Substrat composite de dissipation thermique en carbure de tungstène et nitrure d'aluminium (WC- AlN )

Substrat de dissipation thermique composite en carbure de tungstène et carbure de silicium (WC- SiC )

- (5) Substrat de dissipation thermique composite en carbure de tungstène et nitrure de bore (WC-BN)

###### 14.1.3 Technologie, principes et améliorations des matrices en carbure cimenté et des substrats de dissipation thermique

###### 14.1.2 Optimisation de la conductivité électrique du carbure cimenté

##### 14.2 Applications biomédicales du carbure cimenté

###### 14.2.1 Implants et outils en carbure

###### 14.2.2 Biocompatibilité et modification de surface du carbure cimenté

##### 14.3 Application du carbure cimenté à la catalyse et au stockage d'énergie

Catalyseur composite carbure de tungstène-platine ( WCPt )

###### 14.3.2 Potentiel du carbure cimenté dans les piles à combustible, les supercondensateurs, le stockage d'hydrogène et les batteries au lithium

##### 14.4 Fabrication additive en carbure cimenté (impression 3D)

###### 14.4.1 Technologie d'impression de matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) (SLM, Binder Jetting, DED, EBM)

matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) bidimensionnel (2D)

###### 14.4.3 Performances et défis de l'impression 3D de matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) (porosité < 2 %)

##### 14.5 Applications du carbure cimenté dans la défense et les environnements extrêmes

###### 14.5.1 Application des matériaux à base de carbure de tungstène ( WC ) dans les domaines de la défense et de l'armée

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

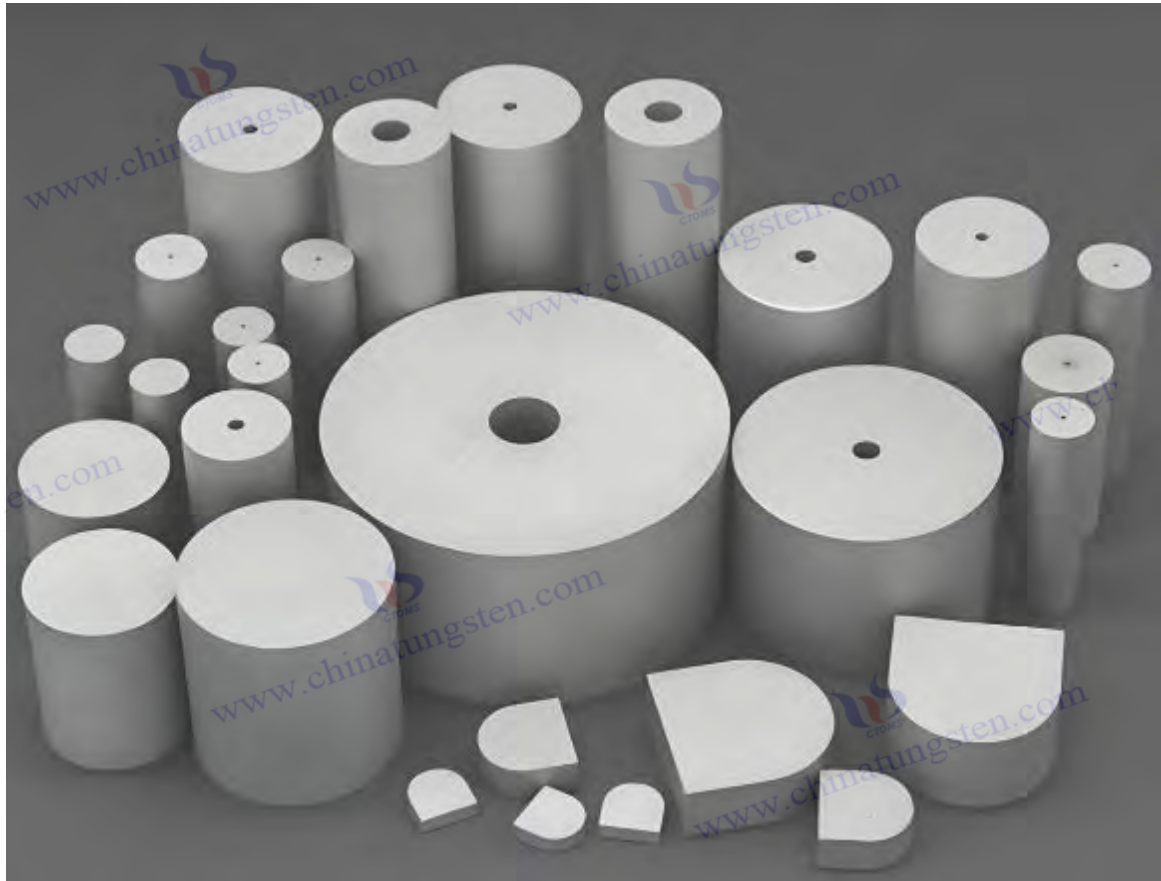
- 14.5.2 Application des matériaux à base de WC dans les environnements extrêmes des grands fonds marins et de l'espace
- 14.5.3 Défis de performance aux rayonnements et aux chocs thermiques des matériaux à base de carbure cimenté ( WC )
- 14.6 Fabrication intelligente et application de capteurs en carbure cimenté
- 14.6.1 Technologie des capteurs (pression, température, vibrations) à base de carbure de tungstène ( WC )
- 14.6.2 Outils et applications de surveillance des matériaux à base de carbure de tungstène (WC ) dans la fabrication intelligente
- 14.6.3 Propriétés et défis des matériaux à base de carbure de tungstène (WC )

## Références

### appendice:

- Catalyseurs à base de carbure de tungstène (WC ) pour piles à combustible
- Un examen de l'application du carbure cimenté dans les piles à combustible
- Carbure conducteur
- Outils biomédicaux en carbure cimenté
- Implants médicaux en carbure
- Substrat de dissipateur thermique en carbure
- Moule d'emballage de copeaux de carbure
- ASTM E92-23 Méthode d'essai standard pour la dureté Vickers et la dureté Knoop des matériaux métalliques
- ASTM G65-23 Méthode d'essai standard pour les essais d'abrasion des métaux et alliages sur sable sec/roue en caoutchouc
- moules en carbure cimenté ?
- JB/T 8144-2010 Exigences techniques pour les matrices d'emboutissage
- Matrices d'emboutissage en carbure Conditions techniques
- YB/T 5136-2006 Exigences techniques pour les moules de métallurgie des poudres
- GB/T 6110-2021 Matrices d'emboutissage - Types de structures et dimensions des matrices d'emboutissage en carbure cimenté
- JB/T 3943-2017 Matrices d'emboutissage - Spécifications techniques des matrices d'emboutissage en carbure
- Quelles sont les caractéristiques et les domaines d'application des substrats de dissipation thermique en carbure cimenté ?
- Quelles sont les applications du carbure cimenté en catalyse et en stockage d'énergie ?
- Quelles sont les applications du carbure cimenté dans le domaine médical ?
- Types, caractéristiques, performances et problèmes de l'impression 3D de matériaux en carbure cimenté

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

## CTIA GROUP LTD

### 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

#### Core Advantages

**30 years of experience:** We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

**Precision customization:** Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

**Quality cost:** Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

#### Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

#### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)