

Carbure de tungstène cimenté

Exploration complète des propriétés physiques et chimiques, des processus et des applications (IX)

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
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 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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

Partie 3 : Optimisation des performances du carbure cimenté

Chapitre 9 : Multifonctionnalisation du carbure cimenté

La multifonctionnalité du carbure cimenté peut répondre **aux besoins complexes** de l'aérospatiale (durée de vie $> 10^4$ heures $\pm 10^3$ heures), de la fabrication électronique (résistivité $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) et des équipements intelligents (temps de réponse $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$) en régulant la conductivité, le magnétisme, la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion, l'autolubrification et les capacités de réponse intelligentes. Le carbure cimenté traditionnel est connu pour sa dureté élevée (HV 1800 ± 30) et sa résistance à l'usure (taux d'usure $< 0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), mais sa conductivité ($\sim 10 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$), son magnétisme (intensité de magnétisation à saturation $< 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) et son adaptabilité sont insuffisants, ce qui limite son application dans des scénarios multifonctionnels. L'optimisation doit commencer par **la microstructure** (taille des grains $0,52 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), **le contrôle de la composition** (TiC $5\%10\% \pm 0,1\%$, Ni $8\%12\% \pm 0,1\%$) et **l'ingénierie de surface** (profondeur de texture $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) pour obtenir une amélioration synergique des performances.

discute de la voie multifonctionnelle du carbure cimenté sous les aspects de (1) conductivité électrique et (2) régulation magnétique, (3) performance composite conductrice résistante à l'usure et à la corrosion, (4) autolubrification et anti-adhérence, et (5) carbure cimenté bionique et intelligent. La conductivité électrique et la régulation magnétique sont optimisées par la teneur en Co ($10\% \pm 1\%$) et la substitution Ni ; la performance composite conductrice résistante à l'usure et à la corrosion se concentre sur le système WCTiCNi (dureté $> \text{HV } 1600 \pm 30$, taux de corrosion $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,001 \text{ mm/an}$) ; l'autolubrification et l'antiadhérence introduisent MoS₂ ($5\% \pm 0,1\%$) et la texture de surface (coefficient de frottement $< 0,2 \pm 0,01$) ; Le carbure cimenté bionique et intelligent s'appuie sur une structure à gradient (porosité $5\% \text{ } 20\% \pm 1\%$) et des matériaux réactifs (taux de déformation $< 0,1\% \pm 0,01\%$), et se tourne vers des applications intelligentes. Ce chapitre fait le lien avec le chapitre 8 (dureté du revêtement Cr₃C₂ $> \text{HV } 1500 \pm 30$) et constitue la base du chapitre 10 (Fabrication verte).

9.1 Contrôle de la conductivité électrique et des propriétés magnétiques du carbure cimenté

Français La conductivité électrique (conductivité $\sim 10 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$) et les propriétés magnétiques (magnétisation à saturation $< 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) du carbure cimenté affectent directement son application dans **les contacts électroniques** (résistivité $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), **les tests magnétiques** (sensibilité $> 95\% \pm 2\%$) et le contrôle qualité. La résistivité élevée du WC ($100 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) doit être optimisée par la phase de liaison Co ou Ni (conductivité $> 15 \text{ MS/m} \pm 0,2 \text{ MS/m}$), tandis que le ferromagnétisme du Co (coercivité $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) fournit une base pour les tests non destructifs. La régulation nécessite un équilibre entre la conductivité, le magnétisme et les propriétés mécaniques ($K_{IC} 1015 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$).

Cette section aborde le mécanisme de contrôle et son application du point de vue de la conductivité, de la détection magnétique et du contrôle qualité du carbure cimenté, en combinant la théorie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

électrique (modèle de Drude), l'analyse magnétique (VSM, précision $\pm 0,1 \text{ um/g}$) et des cas d'ingénierie. Par exemple, le WC10Co (Co 10 % ± 1 %) présente une conductivité de $10,5 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$ et une magnétisation de $8 \text{ um/g} \pm 0,5 \text{ um/g}$, ce qui répond aux exigences des contacts électroniques et de la détection qualité.

9.1.1 Conductivité électrique du carbure cimenté (~10 MS/m)

9.1.1.1 Aperçu du principe et de la technologie de conductivité du carbure cimenté

La conductivité électrique du carbure cimenté (cible d'environ $10 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$) est dominée par la conductivité de la phase de liaison Co ($15 \text{ MS/m} \pm 0,2 \text{ MS/m}$), et les propriétés semi-conductrices du WC (résistivité de $100 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 5 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) limitent les performances globales. La conductivité électrique σ suit le modèle de Drude :

$$\sigma = \frac{n e^2 \tau}{m}$$

Où n est la densité électronique libre ($\sim 10^{28} \text{ m}^{-3} \pm 10^{27} \text{ m}^{-3}$), e est la charge électronique ($1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$), τ est le temps de relaxation ($10^{-14} \text{ s} \pm 10^{-15} \text{ s}$), et m est la masse électronique ($9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$). La valeur élevée de n du Co augmente σ , tandis que les grains de WC ($0,52 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$) augmentent la diffusion de l'interface (taux de diffusion $10^{-14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{-13} \text{ m}^{-2}$), réduisant la conductivité. L'objectif d'optimisation est une résistivité $< 12 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ pour répondre aux exigences des contacts électroniques. (Le modèle de conductivité électrique de Drude (σ) est une théorie classique utilisée pour décrire le comportement des porteurs de charge (tels que les électrons libres) dans les métaux sous l'action d'un champ électrique. Ce modèle a été proposé par Paul Drude en 1900 et suppose que les électrons des métaux se déplacent aléatoirement dans le réseau cristallin sous forme de particules libres et dérivent de manière directionnelle sous l'effet d'un champ électrique.)

Le test adopte la méthode à quatre sondes (courant $1 \text{ mA} \pm 0,01 \text{ mA}$, précision $\pm 0,01 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$), et la taille de l'échantillon est de $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Par exemple, la résistivité du WC10Co (Co 10 % ± 1 %) est de $11 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, ce qui est meilleur que $15 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ du WC6Co. L'amélioration de la conductivité réduit non seulement la chaleur Joule ($< 0,1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,01 \text{ W/cm}^2$), mais améliore également l'efficacité de la transmission du signal ($> 99 \% \pm 1 \%$). Cette section analyse le mécanisme, les tests et l'optimisation. (La méthode **des quatre sondes** est une technique précise pour mesurer la conductivité électrique ou la résistivité des matériaux, particulièrement adaptée à la caractérisation des semi-conducteurs, des films minces et des matériaux conducteurs. Cette méthode réduit l'influence de la résistance de contact et des facteurs géométriques en utilisant quatre sondes (généralement des aiguilles ou des électrodes métalliques) pour améliorer la précision de la mesure.)

9.1.1.2 Analyse du mécanisme de conductivité électrique dans les carbures cimentés

Les carbures cimentés, dont la phase dure est le carbure de tungstène (WC) et la phase de liaison est le cobalt (Cobalt, Co) ou le nickel (Ni). Ce matériau composite présente une dureté élevée, une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance élevée à l'usure et une bonne conductivité électrique. Le mécanisme de sa conductivité électrique est principalement influencé par la composition du matériau, sa microstructure et ses propriétés de transport d'électrons. S'appuyant sur la théorie classique et la recherche moderne, cet article analyse brièvement le mécanisme de conductivité du carbure cimenté :

(1) Contribution de la phase de liaison

Rôle dominant du cobalt dans la conductivité : Phase hautement conductrice, le cobalt présente une résistivité d' environ $6 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et domine la transmission du courant en formant un réseau continu (fraction volumique $10 \% \pm 1 \%$). Les électrons libres du cobalt dérivent de manière directionnelle sous l'action d'un champ électrique, principale source de conductivité du carbure cimenté.

Substitution du nickel

L'ajout de nickel ($8\%-12\% \pm 0,1\%$, résistivité d'environ $7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) peut remplacer le cobalt et réduire encore la résistivité à $< 11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Le niveau de Fermi du nickel (environ $7 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) est similaire à celui du cobalt, et la conductivité est comparable, mais la résistance à la corrosion est meilleure (densité de courant de corrosion $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), ce qui le rend adapté aux applications en environnements difficiles.

Effet de la teneur en phase liante

À mesure que la proportion de la phase de liaison augmente (par exemple de 6% à 15%), la conductivité augmente de manière significative en raison de l'augmentation du nombre de chemins de migration des électrons ; à l'inverse, à mesure que la phase de liaison diminue, la conductivité diminue.

(2) Limitation de la phase dure

Faible conductivité électrique du carbure de tungstène

Le WC présente des caractéristiques de liaison covalente (l'énergie de liaison du WC est d'environ $700 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$), une faible mobilité électronique ($< 10 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s} \pm 1 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$) et une résistivité élevée (environ $100 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), et sa contribution à la conductivité globale est limitée.

Effet de particules

Les particules de WC sont dispersées dans la phase liante, ce qui entrave la libre circulation des électrons et entraîne une diminution de la conductivité avec l'augmentation de la teneur en WC.

(3) Influence de la microstructure

Taille des grains et densité des joints de grains

La taille des grains est d'environ $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, ce qui augmente la densité des joints de grains ($> 10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$), ce qui entraîne une diffusion d'interface améliorée et une augmentation de la résistivité d'environ $10 \% \pm 2 \%$. Bien que les grains fins augmentent la dureté, ils ne sont pas propices à la conductivité.

Uniformité de la distribution des phases de liaison

L'uniformité de la distribution du Co ou du Ni (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) est essentielle à la conductivité. Une ségrégation ($> 0,5 \% \pm 0,1 \%$) peut entraîner une augmentation locale de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistivité d'environ $20 \% \pm 3 \%$, affectant les performances globales.

Continuité du réseau

L'analyse SEM a montré que le réseau Co/Ni dans l'alliage WC-10%Ni avait une continuité élevée ($> 95 \% \pm 2 \%$), et l'EDS a confirmé que la distribution du Ni était uniforme (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), ce qui a considérablement amélioré la conductivité.

Porosité et défauts

La porosité ou les microfissures dans le matériau augmentent la diffusion des électrons et réduisent la conductivité.

(4) Effet de la température

À basse température, la diffusion électron-phonon est réduite et la conductivité reste stable.

À des températures élevées ($> 100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$), les vibrations thermiques s'intensifient, la diffusion est renforcée et le temps de collision moyen τ diminue d'environ $10 \% \pm 2 \%$, ce qui entraîne une légère augmentation de la résistivité ($< 5 \% \pm 1 \%$), qui se manifeste par une diminution de la conductivité.

(5) Vérification expérimentale

Méthode des quatre sondes

En mesurant la résistivité et en la combinant avec une analyse microstructurale (telle que SEM et EDS), les effets du rapport de phase de liaison, de la taille des grains et de l'uniformité de la distribution sur la conductivité sont vérifiés.

Valeur typique

WC-10%Co 硬质合金电导率约为 $1 \times 10^9 \text{ S/m}$, 随 Co 含量增加可达 $2 \times 10^9 \text{ S/m}$; La résistivité de l'alliage WC-10%Ni peut être optimisée à $< 11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$.

La conductivité électrique du carbure cimenté est principalement dominée par les électrons libres de la phase de liaison (comme le Co ou le Ni), et est modulée par des facteurs tels que la teneur en WC, la microstructure (taille des grains, uniformité de distribution, réseau continu) et la température. L'optimisation du rapport de phase de liaison, l'amélioration de l'uniformité de distribution, la réduction des défauts et l'ajustement de la taille des grains peuvent améliorer efficacement la conductivité électrique. L'introduction du Ni optimise encore la résistance à la corrosion et la conductivité, ouvrant de nouvelles perspectives pour le carbure cimenté dans des applications telles que l'électroérosion et les revêtements conducteurs. Cette analyse des mécanismes fournit des orientations théoriques pour la conception des matériaux et l'optimisation des performances.

9.1.1.3 Analyse des facteurs affectant la conductivité du carbure cimenté

La conductivité électrique est une propriété électrique importante du carbure cimenté, qui influence directement ses performances en électroérosion, revêtements conducteurs, dispositifs électroniques et applications de réponse intelligente. Cette performance est influencée par une combinaison de facteurs, notamment la composition du matériau, sa microstructure, son procédé de préparation et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

son état de surface. Ces facteurs influencent significativement les propriétés électriques du carbure cimenté en agissant sur le chemin de migration des électrons, le mécanisme de diffusion, les caractéristiques de contact et l'uniformité globale du matériau. L'analyse détaillée des principaux facteurs d'influence, combinée à des données expérimentales, des observations microscopiques et des cas d'application technique, permet d'explorer en profondeur son mécanisme et sa stratégie d'optimisation, afin de fournir un soutien théorique et des orientations pratiques pour le développement du carbure cimenté dans le domaine des hautes performances.

9.1.1.3.1 Facteurs affectant la conductivité électrique du carbure cimenté - Teneur en Co/Ni

(1) Mécanisme d'influence

Le Co ou le Ni, en tant que phase de liaison du carbure cimenté, est le principal contributeur à la conductivité électrique. Son rôle est de former un réseau conducteur continu et de fournir une densité d'électrons libres. Lorsque la teneur en Co/Ni est de $10\% \pm 1\%$, la résistivité est d'environ $11\ \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$, ce qui montre une excellente conductivité. Cela est dû au fait qu'une quantité appropriée de phase de liaison peut connecter efficacement les particules de WC et réduire le chemin de diffusion des électrons. L'analyse SEM montre qu'à cette teneur, le Co ou le Ni est uniformément réparti (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), et que la force de liaison est $> 100\ \text{MPa} \pm 10\ \text{MPa}$, assurant la stabilité du réseau conducteur. Cependant, lorsque la teneur dépasse $12\% \pm 1\%$, la ténacité à la rupture (ténacité à la rupture, K_{1c}) diminue d'environ $10\% \pm 2\%$. Ceci est principalement dû au rapport de phase de liaison excessivement élevé conduisant à un affaiblissement des joints de grains, augmentant la diffusion des électrons et la résistivité locale, et réduisant ainsi la conductivité globale. L'examen EDS a en outre montré qu'une teneur élevée en Co peut induire une ségrégation (le rapport Ni:Co s'écarte de $1:1 \pm 0,1$), aggravant l'inhomogénéité conductrice.

(2) Stratégie d'optimisation

En contrôlant la teneur en Co/Ni dans la plage de 8 à 12 %, il est possible d'équilibrer les propriétés mécaniques (telles que la dureté $> \text{HV } 1400 \pm 30$ et $K_{1c} > 15\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) tout en maintenant une conductivité électrique élevée. ($\pm 0,5$). Dans les applications pratiques, en raison de la ségrégation du Co, la résistivité du WC12Co peut s'élever à $13\ \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$, et la conductivité locale diminue d'environ $15\% \pm 2\%$, tandis que la résistivité du WC10Ni n'est que de $11\ \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ dans les mêmes conditions, ce qui indique que le Ni a une meilleure uniformité et une meilleure capacité anti-ségrégation dans certaines formulations. L'optimisation peut être obtenue en ajustant l'uniformité du mélange de poudre (par exemple en prolongeant le temps de broyage à boulets à 40 heures ± 1 heure) ou en introduisant des éléments d'alliage traces (tels que Cr, $< 1\%$) pour inhiber la ségrégation et améliorer la continuité du réseau conducteur.

9.1.1.3.2 Facteurs affectant la conductivité électrique du carbure cimenté - Taille des grains

(1) Mécanisme d'influence

L'effet de la taille des grains sur la conductivité est principalement obtenu par la densité des joints de grains et la diffusion des électrons. Lorsque la taille des grains est de $0,51\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$, la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

densité des joints de grains est élevée ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$) et la résistivité est faible (environ $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). Cela est dû au fait que les grains fins favorisent le réseau continu de la phase de liaison (comme Co ou Ni), formant un chemin de migration électronique efficace. Les observations au MEB montrent que le carbure cémenté à grains fins (comme le WC-6Co) améliore la diffusion en raison de la densité élevée des joints de grains, mais l'optimisation du réseau de la phase de liaison peut compenser certains des effets. Cependant, lorsque la taille des grains dépasse $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, le nombre de joints de grains diminue considérablement et la diffusion des électrons diminue, mais en raison de l'augmentation de la proportion de phase WC et de l'interruption du réseau de phases de liaison, la résistivité augmente d'environ $15 \% \pm 3 \%$ et la conductivité diminue. L'analyse XPS montre qu'il peut y avoir plus de couches d'oxyde à la surface des gros grains (position du pic O 1s $\sim 532 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), augmentant encore la résistance de contact.

(2) L'analyse microscopique montre

que le carbure cémenté à grains fins (tel que WC-6Co, granulométrie $0,5 \mu\text{m}$) présente une diffusion améliorée en raison de la densité élevée des joints de grains ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$), mais la résistivité peut être maintenue stable en optimisant la distribution de la phase de liaison (telle que Co $10 \% \pm 1 \%$). Le carbure cémenté à gros grains (tel que WC-10Co, $> 2 \mu\text{m}$) présente une conductivité globale réduite en raison de la dominance de la phase WC (résistivité $\sim 50 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). La détection EDS montre que la phase de liaison est inégalement répartie (écart $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$), ce qui aggrave la barrière de migration des électrons.

(3) Optimisation du processus

En contrôlant les paramètres de frittage (tels que $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, pression $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) ou en ajoutant des inhibiteurs de grains (tels que VC $0,5\%-1\%$ ou $\text{Cr}_3\text{C}_2 < 1\%$), la taille des grains peut être stabilisée dans la plage de $0,5-1 \mu\text{m}$, en tenant compte de la conductivité ($< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) et de la dureté ($> \text{HV } 1400 \pm 30$). La technologie Nanograin ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) peut encore améliorer la conductivité, mais le coût de production doit être équilibré.

9.1.1.3.3 Facteurs affectant la conductivité électrique du carbure cémenté - température de frittage

(1) Mécanisme d'influence

La température de frittage affecte directement la distribution de la phase de liaison, l'uniformité microstructurale et la formation du réseau conducteur. À $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, le Co ou le Ni fond et est uniformément distribué (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), assurant la continuité du réseau de phase de liaison et maintenant une conductivité stable (résistivité $\sim 11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). Cependant, lorsque la température dépasse $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, le Co ou le Ni subit une ségrégation évidente, l'écart augmente d'environ $20\% \pm 3\%$, la résistivité locale augmente ($> 13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), et la conductivité globale diminue d'environ $10\% \pm 2\%$. Cela est dû au fait que la phase de liaison migre vers la limite des grains à haute température, détruisant l'uniformité du réseau conducteur.

(2) Analyse thermodynamique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le frittage à haute température ($> 1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) provoque la fusion et l'enrichissement du Co aux joints de grains. L'analyse EDS montre que la teneur en Co dans la zone de ségrégation peut atteindre $15\% \pm 1\%$, la résistivité est $15\%-20\%$ plus élevée et le coefficient de dilatation thermique ($> 6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) peut également induire des microfissures ($< 0,1 \mu\text{m}$). À une température constante de 1450°C , le chauffage par paliers (préchauffage à 1200°C) peut réduire la contrainte thermique ($< 50 \text{ MPa}$) et optimiser la conductivité.

(3) Amélioration du procédé :

L'utilisation d'un frittage progressif ou d'une technologie de refroidissement rapide (taux de refroidissement de $10^{\circ}\text{C}/\text{min} \pm 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$) peut réduire efficacement la ségrégation à haute température et maintenir la stabilité du NiTi (température de décomposition $> 1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$). Associé à une atmosphère protectrice d'Ar, il peut prévenir l'oxydation (position du pic O $1\text{s} < 0,5\%$) et améliorer la constance de la conductivité (écart $< 5\% \pm 1\%$).

9.1.1.3.4 Facteurs affectant la conductivité électrique du carbure cémenté - Additifs

(1)

L'introduction d'additifs modifiera considérablement les propriétés électriques du carbure cémenté. Par exemple, l'ajout de $5\% \pm 0,1\%$ de TiC (résistivité d'environ $50 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 2 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) augmentera la résistivité d'environ $5\% \pm 1\%$. Cela est dû à la faible conductivité du TiC et à ses caractéristiques de liaison covalente qui limitent la migration des électrons. Les observations au MEB montrent que les particules de TiC (taille des particules $\sim 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) sont dispersées dans la matrice WC, augmentant ainsi les sites de diffusion.

(2) D'autres additifs

tels que TaC ou VC (résistivité $30-60 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) ont un effet majeur sur l'affinement du grain ($< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) lorsqu'ils sont ajoutés en petites quantités ($< 2\%$), affectant indirectement la conductivité ; un ajout excessif ($> 3\% \pm 0,1\%$) réduit encore la conductivité (augmentation de la résistivité $> 10\% \pm 2\%$) car leurs propriétés de résistance élevée dominent le réseau conducteur. L'ajout de Mo_2C ($< 1\%$) peut améliorer la distribution de la phase de liaison et augmenter légèrement la conductivité ($< 2\% \pm 0,5\%$).

(3) Conception équilibrée

Dans l'optimisation additive, la conductivité électrique et les propriétés mécaniques (telles que la résistance à l'usure $> 10^4$ heures) doivent être pesées. Habituellement, la teneur en TiC est contrôlée à un niveau bas entre 2% et 5% , combinée à du VC ($< 1\%$) pour affiner les grains, maintenir la résistivité $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et améliorer K_{1c} ($> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$).

9.1.1.3.5 Facteurs affectant la conductivité électrique du carbure cémenté - État de surface

(1) Mécanisme d'influence

La rugosité de surface (R_a) affecte directement la résistance de contact et l'efficacité du transfert

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'électrons. Lorsque $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la surface est plane, la résistance de contact est faible ($< 1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$) et la conductivité est optimale ; lorsque $R_a > 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, l'irrégularité de la surface entraîne une augmentation de la résistance de contact d'environ $10 \% \pm 2 \%$, l'efficacité du transfert d'électrons diminue et la résistivité locale peut atteindre $12,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$.

(2) Influence du traitement

Les processus de polissage ou de meulage (tels que l'utilisation d'abrasifs diamantés) peuvent réduire R_a à $0,02 \mu\text{m}$, améliorant considérablement la conductivité (résistivité jusqu'à $10,8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) ; à l'inverse, le traitement grossier (tel que le tournage ou le sablage, $R_a > 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) augmentera les défauts de surface (tels que les microfissures ou les couches d'oxyde), et la résistivité augmentera d'environ $15 \% \pm 3 \%$. L'oxydation de surface (augmentation de la position du pic O 1s $> 0,5 \%$) détériore davantage la conductivité.

(3) Cas réel :

Après polissage fin ($R_a 0,03 \mu\text{m}$), la résistivité du WC10Co est stabilisée à $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et la résistance de contact de surface est réduite d'environ $20 \% \pm 2 \%$; la résistivité de la surface rugueuse non traitée ($R_a 0,15 \mu\text{m}$) peut atteindre $12,5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, ce qui montre l'importance de l'optimisation de l'état de surface. Après nettoyage par ultrasons, l'épaisseur de la couche d'oxyde est réduite ($< 5 \text{ nm}$), améliorant encore la constance de la conductivité.

9.1.1.3.6 Facteurs affectant la conductivité électrique du carbure cimenté - Exemple complet

En prenant WC12Co et WC10Ni comme exemples, lorsque WC12Co est fritté à $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la résistivité augmente à $13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ en raison de la ségrégation du Co (écart $> 0,5\% \pm 0,1\%$) , la conductivité locale diminue d'environ $15\% \pm 2\%$, et la durée de vie en fatigue est également limitée ($< 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois). Français Lorsque le WC10Ni est fritté à $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, le Ni est uniformément réparti (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), la résistivité reste à $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et K_{1c} est stable à $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$. Combiné à la taille des grains ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et à l'état de surface ($R_a 0,04 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), le WC10Ni présente une meilleure conductivité ($< 11,5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), une meilleure dureté ($\text{HV } 1450 \pm 30$) et une meilleure stabilité, soulignant l'effet synergique de l'optimisation de la composition, du contrôle du processus et du traitement de surface. En EDM, la faible résistivité du WC10Ni ($11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) raccourcit le temps de décharge ($< 0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$) et améliore l'efficacité de l'usinage ($> 20 \% \pm 2 \%$).

L'optimisation de la conductivité du carbure cimenté nécessite une prise en compte complète de multiples facteurs tels que la teneur en Co/Ni (8 à 12 %), la granulométrie ($0,5$ à $1 \mu\text{m}$), la température de frittage (environ 1450°C), les additifs ($\text{TiC} < 5 \%$, $\text{VC} < 1 \%$) et l'état de surface ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$). En contrôlant précisément le rapport de la phase de liaison, en affinant les grains, en optimisant les paramètres de frittage et en améliorant la rugosité de surface, la conductivité peut être significativement améliorée ($< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), tout en tenant compte des propriétés mécaniques (dureté $> \text{HV } 1400 \pm 30$, $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Cette optimisation fournit des indications importantes pour améliorer les performances du carbure cimenté dans l'électroérosion, les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

revêtements conducteurs, les applications à réponse intelligente (temps de réponse $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$) et les dispositifs électroniques. De plus, combinée à une adaptabilité environnementale (température $< 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, humidité 30 à 50 %), elle peut étendre son potentiel d'application aux capteurs aéronautiques (durée de vie en fatigue $> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois) et aux implants médicaux (compatibilité $> 95 \% \pm 2 \%$).

9.1.1.4 Optimisation de la conductivité du carbure

Pour obtenir une résistivité $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, la conductivité électrique du carbure cimenté doit être optimisée sous plusieurs aspects, notamment la composition du matériau, le procédé de préparation, le traitement de surface et les méthodes d'essai. Ces stratégies d'optimisation visent à garantir que les performances répondent aux exigences des applications à haute conductivité (telles que les contacts électroniques, les revêtements conducteurs, les dispositifs de réponse intelligents, etc.) en améliorant l'efficacité de la migration des électrons, en réduisant les pertes par diffusion et en améliorant la continuité et la stabilité du réseau conducteur. Ces stratégies sont combinées aux caractéristiques microstructurales du carbure cimenté (telles que les grains de WC et la distribution de la phase de liaison) et aux exigences de performances macroéconomiques (telles que la dureté $> \text{HV } 1400 \pm 30$, $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Les stratégies spécifiques suivantes sont recommandées par l'analyse théorique, la vérification expérimentale, la caractérisation microscopique et les cas d'application d'ingénierie pour améliorer de manière globale la conductivité électrique tout en tenant compte des propriétés mécaniques, de l'adaptabilité environnementale et de la fiabilité à long terme, posant ainsi une base solide pour l'application généralisée du carbure cimenté dans la fabrication haut de gamme, les domaines technologiques émergents et les conditions de travail extrêmes.

9.1.1.4.1 Optimisation de la conductivité du carbure – Optimisation de la composition

(1) Contrôle de la teneur en Co/Ni

La teneur en Co ou en Ni est fixée à $10 \% \pm 1 \%$ pour fournir le réseau conducteur principal comme phase de liaison. Ce rapport assure une densité électronique libre suffisante (environ $10^{22} \text{ cm}^{-3} \pm 10^{21} \text{ cm}^{-3}$), formant un chemin de migration électronique efficace, tout en évitant le problème de ténacité réduite et de ségrégation causé par une teneur excessive (par exemple $> 12 \% \pm 1 \%$). L'analyse SEM montre que la phase de liaison à $10 \% \pm 1 \%$ est uniformément répartie (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), la force de liaison est $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, la résistivité est stable à $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et la conductivité peut atteindre $9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$. Une teneur trop élevée en Co/Ni augmentera l'affaiblissement des joints de grains (densité de microfissures $> 10^3 \text{ m}^{-2}$), aggravera la diffusion des électrons et la résistivité peut augmenter jusqu'à $13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, tandis que la conductivité diminue d'environ $15 \% \pm 2 \%$, et K_{1c} diminue d'environ $10 \% \pm 2 \%$ ($< 13,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). La détection EDS montre en outre qu'une teneur élevée en Co peut provoquer une ségrégation (le rapport Ni:Co s'écarte de $1:1 \pm 0,1$), augmenter la résistivité locale ($> 14 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) et affecter les performances globales.

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

(2) Optimisation de la taille des grains de WC

La taille des grains de WC est contrôlée à $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ et la diffusion à l'interface est réduite en affinant les grains. Les grains fins augmentent la densité des joints de grains ($> 10^{14} \text{m}^{-2}$), ce qui augmente légèrement la diffusion. Cependant, en optimisant la distribution de la phase de liaison (comme Co $10\% \pm 1\%$), la résistivité globale peut être considérablement réduite à $< 11,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et la conductivité peut être augmentée à $9,1 \times 10^6 \text{S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{S/m}$. Français L'analyse XPS montre que l'épaisseur de la couche d'oxyde à la surface des grains fins ($< 5 \text{nm}$, pic O 1s $\sim 532 \text{eV} \pm 0,1 \text{eV}$) est réduite, ce qui améliore l'efficacité du transfert d'électrons et réduit la section efficace de diffusion à $< 10^{-18} \text{m}^2$. Par rapport à une taille de grain $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ Les échantillons à gros grains (résistivité augmentée de $15\% \pm 3\%$, environ $13\text{-}14 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) et la conception à grains fins prennent en compte à la fois la conductivité et la dureté (HV 1450 ± 30), et la durée de vie en fatigue ($> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois) est également garantie.

(3) La micro-conception

supprime la croissance excessive des grains en ajoutant des traces d'inhibiteurs de grains (tels que VC $0,5\%$ - 1% ou $\text{Cr}_3\text{C}_2 < 1\%$), stabilisant davantage la taille des grains dans la plage de $0,5\text{-}1 \mu\text{m}$. Ces inhibiteurs réduisent l'énergie du joint de grain WC ($< 1 \text{J/m}^2$), améliorent la connectivité du réseau conducteur (surface de contact $> 95\% \pm 2\%$), et réduisent la résistivité à $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. La détection EDS montre que les inhibiteurs sont uniformément répartis (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), évitant la réduction de la conductivité locale ($< 1\% \pm 0,5\%$), tout en améliorant $\text{K}_{1c} \text{K}_{\{1c\}}$ $\text{K}_{1c} (> 15,5 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5)$. Un inhibiteur excessif ($> 2\% \pm 0,1\%$) peut introduire une phase de résistance élevée (telle que VC, résistivité $\sim 60 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), et la quantité ajoutée doit être strictement contrôlée.

(4) Exemple d'effet

En prenant WC10Co comme exemple, dans des conditions de granulométrie de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la résistivité est stable à $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et la conductivité est meilleure que celle de l'échantillon à gros grains ($> 2 \mu\text{m}$) (résistivité $\sim 13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et la conductivité est réduite à $7,7 \times 10^6 \text{S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{S/m}$). Grâce à la conception intelligente du NiTi $3\% \pm 0,1\%$, la résistivité de l'échantillon WC3NiTi est maintenue à $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ pour une granulométrie identique, et le taux de déformation de $0,05\% \pm 0,01\%$ n'affecte pas la conductivité. Le temps de réponse de $0,8 \text{ms} \pm 0,1 \text{ms}$ témoigne de la stabilité de la conductivité sous charge dynamique, ce qui confirme l'efficacité et la polyvalence de l'optimisation de la composition.

9.1.1.4.2 Optimisation de la conductivité du carbure - Optimisation du processus de frittage

(1) Contrôle de la température

La température de frittage a été fixée à $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ pour éviter la ségrégation Co/Ni (écart $> 0,5\% \pm 0,1\%$) causée par une température élevée ($> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) et assurer une distribution uniforme de la phase de liaison (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), maintenant ainsi une faible résistivité ($\sim 11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, conductivité $\sim 9 \times 10^6 \text{S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{S/m}$). Les observations SEM ont montré qu'à 1450°C , Co ou Ni fondaient et formaient un réseau continu, l'oxydation des joints de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

grains (position du pic O 1s < 0,5%) était minimisée et les pertes par diffusion étaient réduites d'environ 5% ± 1%. Lorsque la température dépasse 1500°C, la résistivité dans la zone de ségrégation augmente à 13-14 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm, la conductivité diminue d'environ 10% ± 2% et la densité des microfissures augmente à > 10⁻³ m⁻², affectant la fiabilité à long terme.

(2)

La pression de frittage sous vide est contrôlée à < 10⁻³ Pa ± 10⁻⁴ Pa, ce qui réduit efficacement l'oxydation et la formation de pores (porosité < 0,5 % ± 0,1 %) et augmente la densité du matériau à > 99,5 % ± 0,1 %. La densité élevée réduit le chemin de diffusion des électrons (section efficace de diffusion < 10⁻¹⁸ m²), améliorant considérablement la conductivité, avec une résistivité réduite à 10,8 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm et une conductivité augmentée à 9,3 × 10⁶ S/m ± 0,1 × 10⁶ S/m. Par rapport au frittage à pression atmosphérique (densité ~98 % ± 0,1 %, résistivité ~12 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm), la conductivité sous vide est améliorée d'environ 5 % ± 1 %, et la durée de vie en fatigue (> 10⁶ fois ± 10⁵ fois) est également améliorée en raison de la densité structurale.

(3) L'optimisation du processus

utilise le frittage gradué (pré-frittage à basse température à 1200°C ± 10°C pendant 1 heure puis augmentation à 1450°C ± 10°C) ou la technologie de refroidissement rapide (vitesse de refroidissement 10°C/min ± 1°C/min) pour inhiber la croissance anormale des grains (> 2 μm ± 0,01 μm) et la séparation de phase (comme la ségrégation de Co > 0,5% ± 0,1%), et réduire encore la résistivité d'environ 5%-8% (à 10,5-11 μΩ·cm). L'analyse de simulation thermique montre que le frittage gradué réduit la contrainte thermique (< 50 MPa), optimise l'uniformité microstructurale (écart < 0,1 % ± 0,02 %), maintient une densité de joint de grains > 10¹⁴ m⁻² et améliore l'efficacité de la migration des électrons d'environ 6 % ± 1 %. Le refroidissement rapide réduit également la distorsion de transformation de phase NiTi (< 1 % ± 0,5 %), garantissant des performances de réponse intelligente (taux de déformation < 0,1 % ± 0,01 %).

(4) Renforcement par traitement thermique

Après frittage, un revenu à basse température (800 °C ± 10 °C, 2 heures ± 0,1 heure) a été effectué pour éliminer les contraintes internes (< 30 MPa), optimiser la microstructure et améliorer la continuité de la phase de liaison (zone de contact > 96 % ± 2 %). La détection XPS a montré que l'épaisseur de la couche d'oxyde de surface a diminué après le revenu (< 3 nm, la position du pic O 1s a augmenté < 0,3 % ± 0,01 %), la résistivité a été stabilisée à 11 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm et la conductivité a été augmentée à 9,1 × 10⁶ S/m ± 0,1 × 10⁶ S/m. La trempe a également amélioré le K_{1c} (> 16 MPa·m^{1/2} ± 0,5) et la durée de vie en fatigue (> 10⁶ fois ± 10⁵ fois), particulièrement adapté aux capteurs d'aviation (résistance à haute température > 400°C) et aux outils intelligents (durée de vie > 5000 m ± 500 m).

9.1.1.4.3 Optimisation de la conductivité du carbure - Optimisation du traitement de surface

(1) Procédé de polissage :

La rugosité de surface (Ra) est contrôlée à < 0,05 μm ± 0,01 μm par polissage au diamant

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(granulométrie 1-3 μm) ou meulage ultra-précis. La surface plane réduit la résistance de contact d'environ $10\% \pm 2\%$ (de $1,2\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ à $1\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$) et améliore l'efficacité du transfert d'électrons (conductivité augmentée de $> 5\% \pm 1\%$). L'analyse SEM montre que les défauts de surface (microfissures $< 0,1\text{ }\mu\text{m}$, densité $< 10^2\text{ m}^{-2}$) de $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m}$ sont considérablement réduits, la surface de contact est augmentée à $> 95\% \pm 2\%$ et la perte par diffusion est réduite d'environ $5\% \pm 1\%$. Par rapport à la surface rugueuse de $R_a > 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, la conductivité diminue d'environ $10\% \pm 2\%$.

(2) Nettoyage de surface :

Utiliser de l'éthanol anhydre ou un nettoyage par ultrasons (fréquence 40 kHz, 5 à 10 minutes) pour éliminer l'huile de surface, la couche d'oxyde (épaisseur $< 5\text{ nm}$, pic O 1s $\sim 532\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$) et les contaminants afin de garantir la constance de la conductivité de la surface de contact (écart $< 2\% \pm 0,5\%$). Après le nettoyage, la résistance de contact a diminué d'environ $5\% \pm 1\%$ (à $1,1\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$), la résistivité s'est stabilisée à $11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ et la conductivité a augmenté à $9,1 \times 10^6\text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6\text{ S/m}$. La détection XPS montre qu'après le nettoyage, la contamination de surface par le carbone (pic C 1s $\sim 284\text{ eV}$) est réduite ($< 5\% \pm 1\%$), ce qui améliore la stabilité de la migration des électrons.

(3) Le renforcement post-traitement

combiné au polissage mécano-chimique (CMP) ou au nettoyage au plasma (puissance 100 W, 10 minutes) peut réduire davantage R_a à $0,02\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, la résistance de contact peut être réduite à moins de $0,5\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ et la conductivité est augmentée à $9,3 \times 10^6\text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6\text{ S/m}$, ce qui est particulièrement adapté aux applications électroniques de haute précision (telles que la résistance de contact $< 0,1\text{ m}\Omega$). Le traitement au plasma élimine la couche d'oxyde résiduelle ($< 2\text{ nm}$, augmentation de la position du pic O 1s $< 0,2\% \pm 0,01\%$), améliore la conductivité de surface d'environ $8\% \pm 2\%$ et améliore la résistance à la corrosion (densité de courant de corrosion $< 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$), adapté aux environnements marins (humidité $> 80\% \pm 5\%$).

(4) La vérification réelle montre qu'après

que WC10Ni est poli à $R_a 0,04\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, la résistivité diminue de $12\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ à $11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, et la conductivité augmente d'environ $8\% \pm 1\%$ (à $9,1 \times 10^6\text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6\text{ S/m}$). Par rapport à la surface rugueuse non traitée ($R_a 0,15\text{ }\mu\text{m}$, résistivité $12,5\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, conductivité $8 \times 10^6\text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6\text{ S/m}$), l'optimisation de surface améliore considérablement l'efficacité de la transmission des électrons, en particulier dans l'outil intelligent (force de coupe $< 10\text{ N} \pm 1\text{ N}$, précision d'usinage $< 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$), et la durée de vie est augmentée à $> 5000\text{ m} \pm 500\text{ m}$.

9.1.1.4.4 Optimisation de la conductivité du carbure - Substitution du Ni

(1) Optimisation de la teneur en Ni

La teneur en Ni est fixée à $8\%-10\% \pm 0,1\%$, remplaçant une partie ou la totalité du Co. La résistivité du Ni (environ $7\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) est légèrement supérieure à celle du Co ($6\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\mu\Omega\cdot\text{cm}$), mais sa résistance à la corrosion est meilleure (densité de courant de corrosion $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), ce qui convient aux environnements humides ou corrosifs (tels que les équipements marins, les implants médicaux). L'analyse SEM montre que le Ni est uniformément réparti (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), la force de liaison est $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ et l'oxydation des joints de grains (position du pic O 1s $< 0,5 \%$) est inférieure à celle du Co ($< 1 \% \pm 0,1 \%$), ce qui améliore la stabilité à long terme.

(2) Comparaison des performances :

Comparé au WC10Co, le taux de corrosion du WC10Ni dans une solution à 3,5 % de NaCl est réduit d'environ $20 \% \pm 2 \%$ ($< 0,02 \text{ mm/an}$), la résistivité est maintenue à $11 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ et la conductivité est stable à $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$. La détection XPS montre qu'une couche de passivation (NiO, épaisseur $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) se forme sur la surface du Ni et que la résistance à l'oxydation est améliorée (la position du pic O 1s augmente $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$). Dans un environnement de $\text{pH} < 4$ ou de température élevée ($> 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$), le taux de perte de poids de l'échantillon de Ni ($< 0,05 \text{ mg/cm}^2$) est bien inférieur à celui de Co ($> 0,1 \text{ mg/cm}^2$).

9.1.1.4.5 Optimisation de la conductivité du carbure cémenté - équilibre entre conductivité et résistance à la corrosion

(1) Propriétés électriques du Ni

Le niveau de Fermi du Ni (environ $7 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) est proche de celui du Co ($\sim 6,5 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), et la capacité de formation de réseau conducteur est comparable. Combinée à une distribution uniforme (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), la résistivité peut être contrôlée à $< 11 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, la conductivité atteint $9,2 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$, et le K_{1c} est maintenu à $> 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$. Le point de fusion plus élevé du Ni ($1455^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) est plus stable que celui du Co ($1495^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), réduisant la ségrégation à haute température ($< 0,2\% \pm 0,02\%$).

(2) Scénarios d'application :

Dans les environnements corrosifs (tels que $\text{pH} < 4$, humidité $> 80 \% \pm 5 \%$ ou immersion dans l'eau de mer), la substitution Ni peut prolonger la durée de vie ($> 10^4 \text{ heures} \pm 10^3 \text{ heures}$), particulièrement adaptée aux capteurs d'aviation (résistance aux hautes températures $> 400^\circ\text{C}$, durée de vie en fatigue $> 10^6 \text{ fois} \pm 10^5 \text{ fois}$) et aux implants médicaux (compatibilité $> 95 \% \pm 2 \%$), et réduire la biocorrosion ($< 0,01 \text{ mm/an}$).

9.1.1.4.6 Optimisation de la conductivité du carbure - Conception des alliages

(1) Phase de liaison mixte Co/Ni

Grâce à la phase de liaison mixte Co/Ni (telle que $\text{Co } 5 \% + \text{Ni } 5 \% \pm 0,1 \%$), la résistance à la corrosion du Ni et la conductivité élevée du Co (résistivité $\sim 6 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$) sont optimisées de manière synergique. L'adaptation du niveau de Fermi de la phase mixte ($\sim 6,7 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) améliore l'efficacité de la migration des électrons, et la résistivité peut être encore réduite à $10,5 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, et la conductivité est augmentée à $9,5 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$. L'analyse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SEM montre que la phase mixte est uniformément répartie (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) et que l'oxydation des joints de grains est réduite (position du pic O 1s $< 0,3 \% \pm 0,01 \%$).

(2) La phase mixte micro-optimisée

optimise la continuité du réseau de phase de liaison (surface de contact $> 96 \% \pm 2 \%$), réduit les pertes par diffusion à $< 5 \% \pm 1 \%$ et raccourcit la longueur du trajet de migration des électrons d'environ $10 \% \pm 2 \%$. La détection EDS montre que le rapport Co/Ni ($1:1 \pm 0,1$) est stable, la résistance aux joints de grains ($> 110 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) est améliorée et K_{1c} augmente à $16,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$.

(3) Application pratique

du WC10 (Ni5Co5) Dans les contacts électroniques en milieu marin, la résistivité est stable à $10,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, la conductivité est de $9,5 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$, le taux de corrosion est $< 0,01 \text{ mm/an}$ et la durée de vie est $> 10^5 \text{ heures} \pm 10^4 \text{ heures}$, ce qui est mieux que la formulation simple Co (résistivité $12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, taux de corrosion $0,02 \text{ mm/an}$) ou Ni (résistivité $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, résistance à la corrosion légèrement meilleure). Dans les outils intelligents, la conception à phase mixte réduit la chaleur de coupe ($< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) et augmente la durée de vie à $> 5\,500 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$.

Français La conductivité électrique du carbure cémenté a été optimisée en ajustant la composition (Co/Ni $10 \% \pm 1 \%$, granulométrie $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), en améliorant le processus de frittage (frittage sous vide à 1450°C , densité $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$), le traitement de surface ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et la substitution Ni et la conception hybride. La résistivité a été contrôlée avec succès à $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et la conductivité a été augmentée à $> 9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$. En prenant WC10Ni et WC10(Ni5Co5) comme exemples, la résistivité est respectivement de $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et $10,5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, en tenant compte de la conductivité, de la résistance à la corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) et des propriétés mécaniques (dureté HV 1450 ± 30 , K_{1c} $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Ces stratégies d'optimisation excellent dans les outils intelligents (augmentation de l'efficacité de coupe $> 20 \% \pm 2 \%$), les capteurs aérospatiaux (temps de réponse $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, résistance à haute température $> 400^\circ\text{C}$), les implants médicaux (compatibilité $> 95 \% \pm 2 \%$) et les équipements marins (résistance à la corrosion $> 10^4 \text{ heures}$), et leur potentiel d'application dans des environnements extrêmes (par exemple $> 500^\circ\text{C}$ ou humidité élevée $> 90 \% \pm 5 \%$) peut être encore amélioré grâce à la nanotechnologie (grain $< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) ou aux revêtements conducteurs multicouches (épaisseur $2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

9.1.1.4.7 Spécification d'essai pour la conductivité du carbure cémenté

(1) Application de la méthode des quatre sondes

La méthode des quatre sondes est utilisée pour mesurer la résistivité, en appliquant un courant constant de $1 \text{ mA} \pm 0,01 \text{ mA}$ pour assurer une précision de mesure de $\pm 0,01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, ce qui est adapté à la caractérisation précise des matériaux hautement conducteurs. L'espacement des sondes est réglé à $1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ pour réduire les erreurs géométriques ($< 0,5 \% \pm 0,1 \%$), et la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

distribution du courant est optimisée par une disposition équidistante pour améliorer la répétabilité des résultats de test. Pendant le test, la surface de l'échantillon doit maintenir $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ pour éviter les interférences de la résistance de contact ($< 1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$) causées par la rugosité de la surface. Combinée à un système de contrôle de température (fluctuation de température $< \pm 0,1^\circ\text{C}$), la méthode à quatre sondes permet de capturer avec précision le changement de résistivité avec la température ($< 0,01 \mu\Omega \cdot \text{cm}/^\circ\text{C}$), ce qui est particulièrement adapté à l'évaluation de la stabilité électrique des carbures cimentés à réponse intelligente (tels que WC3NiTi) dans des environnements dynamiques.

(2) Contrôle environnemental

La température d'essai est contrôlée à $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et l'humidité est $< 65\% \pm 5\%$ pour éviter les facteurs environnementaux (tels qu'une température élevée $> 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ou une humidité élevée $> 80\% \pm 5\%$) qui interfèrent avec la conductivité. Une température excessive peut provoquer une transition de phase NiTi ($A_f \sim 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$), entraînant une augmentation du taux de déformation ($> 0,1\% \pm 0,01\%$) et une fluctuation de la résistivité ($> 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$); une humidité élevée peut provoquer une oxydation de surface (augmentation de la position du pic O 1s $> 0,5\% \pm 0,1\%$) et augmenter la résistance de contact. Une chambre à température et humidité constantes (précision $\pm 0,5^\circ\text{C}$, $\pm 2\%$ HR) est utilisée, combinée à une protection par gaz inerte (tel que Ar), pour maintenir la stabilité et la répétabilité de l'environnement de test (écart $< 1\% \pm 0,5\%$).

(3) Vérification des données

La mesure a été répétée 5 fois et la valeur moyenne a été prise. La microstructure a été analysée par MEB pour confirmer la continuité du réseau de phase de liaison ($> 95\% \pm 2\%$) et l'uniformité de la distribution des grains (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$). Les images MEB peuvent révéler les effets de l'oxydation des joints de grains (position du pic O 1s $< 0,3\%$) et des microfissures ($< 0,1 \mu\text{m}$) sur la conductivité. La détection EDS vérifie le rapport Co/Ni ($1:1 \pm 0,1$) pour garantir la fiabilité des données. L'analyse statistique utilise l'écart type ($< 0,05 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) pour évaluer la cohérence des mesures. Combiné à la haute précision de la méthode à quatre sondes ($\pm 0,01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), l'effet d'optimisation peut être quantifié avec précision (comme la réduction de la résistivité $> 5\% \pm 1\%$).

(4) Exemples de résultats

WC10Ni ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) a été testé par la méthode des quatre sondes, et la résistivité était stable à $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, et la conductivité a atteint $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$, ce qui répond pleinement aux exigences de conductivité des contacts électroniques (tels que les relais et les commutateurs) (résistance de contact $< 0,1 \text{ m}\Omega$). Français Comparé au WC12Co non optimisé (résistivité $13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, conductivité $7,7 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$), la résistivité du WC10Ni a diminué d'environ $15\% \pm 2\%$ dans les conditions de $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et $50\% \pm 5\%$ d'humidité, vérifiant l'effet synergique de l'optimisation de la composition et du traitement de surface. Dans les applications d'outils intelligents, la faible résistivité du WC10Ni permet un EDM efficace (temps de décharge $< 0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$) et une durée de vie $> 5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$.

9.1.1.4.8 Effet d'optimisation globale de la conductivité du carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Français Grâce à l'application complète des stratégies ci-dessus, par exemple, la résistivité de l'alliage WC10Ni peut être optimisée à $10,8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ dans les conditions de frittage sous vide à $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (pression $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$), taille de grain $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ et polissage à $R_a 0,04 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, ce qui est inférieur à la valeur cible de $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, et la conductivité est augmentée à $9,3 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$. Français Cet effet d'optimisation est dû à la continuité du réseau de phase de liaison ($> 96\% \pm 2\%$), à l'optimisation de la densité des joints de grains ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$) et à la réduction de la résistance de contact de surface ($< 1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$). De plus, la substitution Ni ($8\%-10\% \pm 0,1\%$) et le traitement de surface améliorent significativement la résistance à la corrosion (densité de courant de corrosion $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) et les performances de contact (surface de contact $> 95\% \pm 2\%$), ce qui en fait un excellent acteur dans les composants électroniques de haute fiabilité (par exemple, capteurs aérospatiaux, implants médicaux).

Comparé au WC12Co non optimisé (résistivité $13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, taux de corrosion $0,02 \text{ mm/an}$), le WC10Ni optimisé présente une réduction de résistivité d'environ $17\% \pm 2\%$, une amélioration de la résistance à la corrosion d'environ $20\% \pm 2\%$ ($< 0,01 \text{ mm/an}$) et une durée de vie prolongée à $> 10^4 \text{ heures} \pm 10^3 \text{ heures}$.

Le carbure cémenté optimisé répond non seulement aux exigences de conductivité électrique (résistivité $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, conductivité $> 9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$) mais prend également en compte la résistance mécanique (dureté HV 1450 ± 30 , K1c $K_{1c} \{1c\}$ K1c $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) et la durée de vie (résistance à la fatigue $> 10^6 \text{ fois} \pm 10^5 \text{ fois}$).

Français Dans les outils intelligents, l'efficacité de coupe a augmenté de $> 20\% \pm 2\%$ (temps de traitement réduit de $15\% \pm 2\%$), dans les capteurs aéronautiques, temps de réponse de $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, résistance à haute température $> 400^\circ\text{C}$, durée de vie en fatigue $> 10^6 \text{ fois} \pm 10^5 \text{ fois}$; dans les implants médicaux, compatibilité $> 95\% \pm 2\%$, biocorrosion $< 0,01 \text{ mm/an}$, offrant des solutions efficaces et fiables pour les applications industrielles. Ces stratégies favorisent conjointement l'application généralisée du carbure cémenté dans l'électronique, l'aviation, la fabrication d'outils, l'ingénierie médicale et marine. À l'avenir, la nanotechnologie (grain $< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) ou le revêtement conducteur multicouche (épaisseur $2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) pourront être utilisés pour améliorer encore ses performances dans des environnements extrêmes (tels que $> 500^\circ\text{C}$ ou une humidité élevée $> 90\% \pm 5\%$).

L'optimisation de la conductivité du carbure cémenté nécessite un contrôle précis de la composition (Co/Ni $10\% \pm 1\%$, granulométrie $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), une optimisation du procédé (frittage sous vide à 1450°C , densité $> 99,5\% \pm 0,1\%$), un traitement de surface ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et une substitution Ni ($8\%-10\% \pm 0,1\%$). Le test de haute précision de la méthode à quatre sondes (précision $\pm 0,01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) assure la vérification de l'effet d'optimisation, combiné à l'analyse SEM et EDS de la microstructure (réseau de phase de liaison $> 95\% \pm 2\%$), fournissant une base scientifique pour le processus d'optimisation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ces stratégies améliorent non seulement la conductivité électrique ($> 9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$), mais améliorent également la résistance à la corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) et les propriétés mécaniques (dureté $> \text{HV } 1400 \pm 30$), favorisant l'application innovante du carbure cimenté dans la fabrication intelligente, l'aérospatiale et l'ingénierie biomédicale. À l'avenir, la conception de matériaux composites multifonctionnels pourra être explorée pour répondre à des exigences plus élevées.

9.1.1.5 Application technique de la conductivité du carbure

Grâce à ses excellentes propriétés électriques et mécaniques, le carbure cimenté à conductivité optimisée a démontré des avantages significatifs dans de nombreux domaines de l'ingénierie. Grâce à des stratégies telles que l'optimisation de la composition (teneur Co/Ni contrôlée à $10 \% \pm 1 \%$), le contrôle de la microstructure (granulométrie de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et le traitement de surface ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), la résistivité et la conductivité électrique du carbure cimenté ont été considérablement améliorées, lui permettant d'être performant dans les applications exigeantes. Français Associé à une dureté élevée ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), une ténacité à la rupture ($K_{Ic} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) et une résistance à la corrosion (densité de courant de corrosion $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), le carbure cimenté optimisé présente de vastes perspectives d'application dans les domaines de l'électronique, de l'aviation, de la fabrication et des technologies émergentes. Voici les principales applications techniques et les performances de l'optimisation de la conductivité du carbure cimenté, complétées par une analyse microscopique, des données expérimentales et des cas réels, pour explorer pleinement sa valeur technique.

9.1.1.5.1 Contacts électriques en carbure cimenté

(1) Scénarios d'application :

Les contacts électroniques en carbure sont largement utilisés dans les composants électroniques haute fiabilité tels que les relais, les interrupteurs, les disjoncteurs et les dispositifs microélectroniques. Ils doivent présenter une faible résistivité, une résistance élevée à l'usure et une longue durée de vie pour résister aux commutations mécaniques fréquentes et aux arcs électriques. En particulier, dans les unités de contrôle électronique automobile, les systèmes d'automatisation industrielle et l'électronique grand public, les exigences de stabilité électrique et de durabilité des contacts sont particulièrement strictes. Les matériaux traditionnels (tels que les alliages à base d'argent) s'oxydent et s'usent facilement, ce qui limite leur application.

(2) Performance

La résistivité du WC10Ni (granulométrie $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) atteint $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, la conductivité est stable à $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$ et la résistance de contact est inférieure à $0,1 \text{ m}\Omega \pm 0,01 \text{ m}\Omega$, ce qui est nettement meilleur que le WC10Co traditionnel (la résistance de contact est d'environ $0,15 \text{ m}\Omega \pm 0,01 \text{ m}\Omega$). Français Sa durée de vie dépasse 10^6 fois $\pm 10^5$ fois, dépassant de loin les 5×10^5 fois $\pm 5 \times 10^4$ fois du WC10Co, et la durée de vie est augmentée

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'environ $100 \% \pm 10 \%$. La résistance à la corrosion du Ni ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) améliore encore la stabilité des contacts dans les environnements humides (tels que l'humidité $> 80 \% \pm 5 \%$) ou les atmosphères corrosives (telles que le $\text{pH} < 4$), et l'épaisseur de la couche d'oxyde de surface ($< 5 \text{ nm}$, pic O 1s $\sim 532 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) est significativement inférieure à celle du Co ($> 10 \text{ nm}$).

(3) Avantages techniques

Les petits grains et la distribution uniforme du Ni (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) réduisent la diffusion de l'interface (section efficace de diffusion $< 10^{-18} \text{ m}^2$), optimisent la continuité du réseau conducteur (surface de contact $> 95 \% \pm 2 \%$) et assurent la stabilité électrique sous commutation haute fréquence ($> 1 \text{ kHz}$). Combinés à une dureté élevée ($\text{HV } 1450 \pm 30$) et une résistance à l'usure (taux d'usure $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$), les contacts WC10Ni conservent une faible résistivité ($< 11,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) sous l'impact d'un arc (courant $> 10 \text{ A}$), répondant aux exigences de faible perte de puissance des dispositifs microélectroniques (tels que les modules de capteurs).

(4) Exemples d'application

Dans les unités de contrôle électronique automobile, les contacts WC10Ni sont largement utilisés en raison de leur faible résistance de contact et de leur longue durée de vie, réduisant le taux de défaillance ($< 1 \% \pm 0,5 \%$) causé par l'usure par arc ($< 0,1 \mu\text{m} / \text{temps}$). Par rapport aux contacts AgCdO traditionnels (durée de vie 5×10^5 fois, taux de défaillance $> 5 \% \pm 1 \%$), la fiabilité est améliorée d'environ $80 \% \pm 5 \%$. Dans les commutateurs domestiques intelligents, le temps de réponse des contacts WC10Ni ($< 0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$) prend en charge un fonctionnement haute fréquence, répondant aux exigences d'économie d'énergie et de longue durée de vie ($> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois).

9.1.1.5.2 Application technique de la conductivité du carbure - Électrode EDM en carbure

(1) Scénarios d'application :

Les électrodes en carbure sont utilisées pour l'usinage par électroérosion (EDM) et sont particulièrement adaptées à l'usinage de moules de précision, de pièces métalliques complexes (telles que les alliages de titane et l'acier inoxydable) et de microcomposants. Une conductivité électrique élevée est nécessaire pour améliorer l'efficacité de la décharge et réduire le temps d'usinage et les pertes d'électrodes. La fabrication d'aubes de moteurs d'avion, de moules pour dispositifs médicaux et de pièces automobiles impose des exigences plus élevées en matière de précision d'usinage ($< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) et de durabilité des électrodes.

(2) Performance

La conductivité électrique du WC10Co (teneur en Co $10 \% \pm 1 \%$) atteint $10,5 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$, et l'efficacité de traitement dépasse $95 \% \pm 2 \%$, ce qui est bien supérieur à l'électrode en graphite traditionnelle (l'efficacité est d'environ $80 \% \pm 2 \%$). Sa précision de traitement peut être contrôlée à $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, et la rugosité de surface (R_a) est réduite à $0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, ce qui répond aux exigences de haute précision des pales de moteurs d'avion et des moules de dispositifs médicaux.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'électrode a une excellente résistance à l'usure et le taux de perte ($< 0,5 \% \pm 0,1 \%$) est inférieur à celui du graphite ($> 1 \% \pm 0,2 \%$). La durée de vie dépasse 100 heures ± 10 heures, ce qui est beaucoup plus long que les électrodes en graphite (50 heures ± 5 heures).

(3) Avantages techniques

Le réseau conducteur continu formé par la teneur élevée en Co ($10 \% \pm 1 \%$) améliore la capacité de transmission du courant (densité de courant $> 10 \text{ A/mm}^2$). Combinée à la dureté élevée ($> 1500 \text{ HV} \pm 30$) et à la résistance à la chaleur (déformation $< 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) du WC, l'électrode maintient l'intégrité structurale sous une décharge à haute énergie ($> 50 \mu\text{J}$). La granulométrie fine ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) réduit les microfissures ($< 0,1 \mu\text{m}$), optimise l'uniformité de la décharge (écart $< 2 \% \pm 0,5 \%$) et améliore l'efficacité du traitement d'environ $15 \% \pm 2 \%$. Par rapport au graphite, la faible résistivité du WC10Co ($11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) raccourcit le temps de décharge ($< 0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$) et réduit la perte d'énergie d'environ $10 \% \pm 1 \%$.

(4) Exemples d'application

Dans la fabrication de moules, les électrodes WC10Co sont utilisées pour traiter des pièces en acier trempé (dureté $> \text{HRC } 50$), réduisant considérablement le temps de traitement (réduit de $20 \% \text{ à } 30 \% \pm 2 \%$), et la qualité de surface ($R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) répond aux exigences de précision. Par rapport aux électrodes en graphite ($R_a \sim 0,5 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), le processus de finition est réduit d'environ $50 \% \pm 5 \%$. Dans le domaine de l'aviation, les électrodes WC10Co traitent des pales en alliage de titane avec une précision de $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ et une durée de vie de $> 120 \text{ heures} \pm 10 \text{ heures}$, permettant une production à haut rendement.

9.1.1.5.3 Application technique de la conductivité du carbure - Substrat de revêtement conducteur en carbure

(1) Scénarios d'application

En tant que substrat de revêtement conducteur, le carbure cimenté est largement utilisé dans les outils résistants à l'usure (tels que les outils de coupe), les composants électroniques (tels que les cartes de circuits imprimés) et les composants aéronautiques (tels que les aubes de turbine). Il est nécessaire de prendre en compte la conductivité, l'adhérence et les performances de service à long terme. Dans les environnements corrosifs (tels que les équipements marins) ou dans des conditions de température élevée ($> 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), le substrat doit fournir un support électrique stable et une protection mécanique. La faible conductivité des substrats en acier traditionnels ($< 5 \times 10^{-6} \text{ S/m}$) limite leur application.

(2) Performance

WC8Ni (rugosité de surface $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) a une résistivité de $10,8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et une conductivité de $9,3 \times 10^{-6} \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^{-6} \text{ S/m}$. L'adhérence du revêtement dépasse $50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ et la durée de vie dépasse 2 ans $\pm 0,2$ an. Français Comparé au WC8Co (adhérence d'environ $45 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$), la matrice Ni présente un taux de corrosion plus faible ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) et un taux de perte de poids ($< 0,05 \text{ mg/cm}^2$) dans des environnements

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corrosifs (tels qu'une solution de NaCl à 3,5 %) $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) est bien inférieur à celui du Co ($> 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$). L'analyse XPS a montré que la couche de passivation de surface Ni (NiO, épaisseur $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) améliorerait la résistance à la corrosion.

(3) Avantages techniques

La faible rugosité de surface ($R_a < 0,05 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$) réduit la résistance de contact ($< 1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$), la distribution uniforme du Ni (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) et la structure à grains fins ($0,5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$) améliorent la liaison interfaciale entre le revêtement et le substrat (zone de contact $> 96 \% \pm 2 \%$) et prolongent la durée de vie. Associé à une dureté élevée ($\text{HV } 1450 \pm 30$) et une résistance à la chaleur (déformation $< 500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), le substrat WC8Ni prend en charge les performances stables des revêtements multicouches (tels que TiN, épaisseur $2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$) dans des environnements à haute température ou corrosifs.

(4) Exemples d'application

Dans les revêtements de pales d'éoliennes, le revêtement résistant à l'usure supporté par le substrat WC8Ni ne présente aucune dégradation significative après $2,5 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ ans}$ de service dans un environnement de brouillard salin (concentration en NaCl $5 \% \pm 0,5 \%$), et sa conductivité ($> 9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$) et ses performances de protection (taux d'usure $< 0,03 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$) sont meilleures que celles du substrat WC8Co conventionnel ($1,5 \text{ an} \pm 0,2 \text{ an}$ de service, taux d'usure $> 0,05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$). Dans les aubes de turbines d'aviation, le revêtement de barrière thermique supporté par le substrat WC8Ni présente une résistance à haute température $> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, et la stabilité de la conductivité (résistivité $< 11 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}$) prend en charge l'intégration des capteurs.

9.1.1.5.4 Applications techniques de la conductivité du carbure - Autres applications potentielles

(1) Matériaux de blindage électromagnétique en carbure cimenté

Les alliages WC-Ni à conductivité optimisée peuvent être utilisés pour fabriquer des panneaux de blindage électromagnétique légers. Leur conductivité électrique ($> 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$) protège efficacement des ondes électromagnétiques haute fréquence ($> 1 \text{ GHz}$) avec une efficacité de blindage $> 90 \% \pm 2 \%$. La finesse des grains ($0,5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$) et la teneur en Ni ($8\% - 10\% \pm 0,1\%$) améliorent la continuité du réseau conducteur (surface de contact $> 95 \% \pm 2 \%$), et la densité ($\sim 12 \text{ g/cm}^3$) est également très élevée. $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) est environ $25 \% \pm 2 \%$ inférieur à celui du cuivre ($8,9 \text{ g/cm}^3$), ce qui le rend adapté à la conception légère des équipements 5G et de l'avionique.

(2) Le connecteur conducteur en carbure

WC10Ni est devenu un nouveau choix pour remplacer les alliages de cuivre dans les connecteurs à courant élevé en raison de sa faible résistivité ($11 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}$, conductivité $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$) et de sa résistance à haute température ($> 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ sans déformation), avec une réduction de poids d'environ $30\% \pm 2\%$ (densité 12 g/cm^3 contre $8,9 \text{ g/cm}^3$). L'analyse SEM

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

montre que le Ni est uniformément réparti (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$) et présente une bonne résistance à la corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) prend en charge les applications de câbles marins.

(3) Éléments de capteur en carbure

L'alliage WC-Co-Ni à grains fins est utilisé comme matériau d'électrode pour les capteurs de pression et de température de haute précision en raison de ses propriétés électriques stables (résistivité $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, conductivité $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$), avec un temps de réponse de $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ et une précision de $> 99\% \pm 0,5\%$. Les caractéristiques de réponse intelligentes du NiTi $3\% \pm 0,1\%$ (taux de déformation $< 0,1\% \pm 0,01\%$) prennent en charge la surveillance dynamique et conviennent aux capteurs aéronautiques et à l'automatisation industrielle.

9.1.1.5.5 Avantages globaux des applications techniques de la conductivité du carbure cémenté

Ces applications démontrent que les carbures cémentés à conductivité électrique optimisée améliorent significativement la fiabilité dans le secteur de l'électronique. Par exemple, la faible résistance de contact ($< 0,1 \text{ m}\Omega \pm 0,01 \text{ m}\Omega$) des contacts électroniques WC10Ni en commutation haute fréquence ($> 1 \text{ kHz}$) prolonge la durée de vie du dispositif ($> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois) et réduit le taux de défaillance à $< 1\% \pm 0,5\%$. Le rendement élevé ($> 95\% \pm 2\%$) des électrodes WC10Co en EDM réduit les coûts de production (réduits de 20% à $30\% \pm 2\%$) et améliore la qualité de surface ($R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) d'environ $50\% \pm 5\%$. La durée de vie à long terme ($> 2,5$ ans $\pm 0,2$ ans) du substrat de revêtement WC8Ni dans des environnements difficiles (tels que le brouillard salin, $\text{NaCl } 5\% \pm 0,5\%$) répond aux besoins industriels et la résistance à l'usure ($< 0,03 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$) est meilleure que celle des matériaux traditionnels.

Français Le carbure cémenté optimisé présente une faible résistivité ($< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, conductivité $> 10 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$), une conductivité électrique élevée et d'excellentes propriétés mécaniques (dureté $\text{HV } 1450 \pm 30$, $K_{1c} 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), élargissant avec succès ses perspectives d'application dans les contacts électroniques, les électrodes EDM, les substrats de revêtement conducteur, les matériaux de blindage électromagnétique, les connecteurs conducteurs et les éléments de capteur. Dans la fabrication intelligente, les contacts WC10Ni prennent en charge une commutation efficace (temps de réponse $< 0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$), et les électrodes WC10Co améliorent l'efficacité de la production de moules ($> 20\% \pm 2\%$); dans l'aérospatiale, les substrats WC8Ni et les capteurs WC-Co-Ni assurent une stabilité à haute température et une haute précision ($< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$); dans l'ingénierie marine, les connecteurs WC10Ni ont une résistance à la corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) prolonge la durée de vie ($> 10^4$ heures $\pm 10^3$ heures).

Français L'application technique de la conductivité du carbure cémenté bénéficie de l'effet synergique de l'optimisation de la composition (Co/Ni $10\% \pm 1\%$, granulométrie $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), du contrôle du procédé (frittage sous vide à $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, densité $> 99,5\% \pm 0,1\%$) et du traitement de surface ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). Ses excellentes performances dans les contacts électroniques (durée de vie $> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois), les électrodes EDM (rendement $> 95\% \pm 2\%$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et les substrats de revêtement conducteur (durée de vie $> 2 \text{ ans} \pm 0,2 \text{ an}$) vérifient la valeur pratique de l'optimisation de la conductivité. Français De plus, le potentiel des matériaux de blindage électromagnétique (efficacité de blindage $> 90 \% \pm 2 \%$), des connecteurs conducteurs (réduction de poids de $30 \% \pm 2 \%$) et des éléments de capteur (temps de réponse $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$) montre que le carbure cimenté optimisé peut être étendu aux domaines de la technologie 5G, de l'avionique et des soins médicaux intelligents, fournissant une référence importante pour le développement de matériaux hautes performances. À l'avenir, ses capacités d'application dans des environnements extrêmes ($> 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ou une humidité élevée $> 90 \% \pm 5 \%$) pourront être améliorées grâce à des nano-grains ($< 0,3 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$) ou à une conception à gradient fonctionnel.

9.1.2 Essais magnétiques et contrôle qualité du carbure cimenté

Les propriétés magnétiques du carbure cimenté et sa technologie de détection jouent un rôle essentiel dans les essais non destructifs, le contrôle qualité et la prédiction des propriétés mécaniques. Ces propriétés sont principalement déterminées par le ferromagnétisme de la phase de liaison et sont affectées par les effets combinés de la microstructure, de la distribution de la composition et de l'état des défauts. Des essais et analyses magnétiques précis permettent d'évaluer efficacement la qualité interne, l'uniformité et la constance des performances du carbure cimenté, offrant ainsi une garantie fiable pour les applications industrielles. Cette section analyse en profondeur les fondements scientifiques et l'intérêt pratique de la détection magnétique et du contrôle qualité du carbure cimenté en explorant en profondeur le mécanisme magnétique, la technologie d'essai et les applications techniques, en combinant données expérimentales et caractérisation microscopique.

9.1.2.1 Aperçu des principes et technologies magnétiques du carbure cimenté

Principe du magnétisme du carbure

Les propriétés magnétiques du carbure cimenté sont principalement déterminées par le ferromagnétisme de la phase de liaison. Ses paramètres magnétiques comprennent une aimantation à saturation, généralement inférieure à $10 \text{ }\mu\text{m/g} \pm 0,5 \text{ }\mu\text{m/g}$, et une coercivité d'environ $100 \text{ }\mu\text{m/g} \pm 10 \text{ }\mu\text{m/g}$. Ces propriétés lui confèrent une grande valeur applicative pour les essais non destructifs, le contrôle qualité et la prédiction des propriétés mécaniques, et peuvent refléter la distribution de la phase de liaison, l'état des grains et les défauts internes. Associés à une dureté élevée ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), une ténacité à la rupture ($K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) et une résistance à l'usure (taux d'usure $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$), les essais magnétiques constituent un moyen technique essentiel pour l'optimisation des performances et la régularité de production du carbure cimenté. Cette section effectue une analyse complète du mécanisme magnétique, de la technologie de test et de l'application d'ingénierie, visant à révéler la relation intrinsèque entre les propriétés magnétiques et la microstructure et les propriétés mécaniques.

(1) Contribution du ferromagnétisme du Co

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le magnétisme du carbure cimenté provient principalement du ferromagnétisme du Co, dont le moment magnétique est d'environ $1,7 \mu_B \pm 0,1 \mu_B$ (magnéton de Bohr), qui provient du spin et du mouvement orbital des électrons non appariés des atomes de Co. Le Co forme un réseau continu en tant que phase de liaison, et sa teneur et sa distribution affectent directement l'aimantation et la force coercitive. Lorsque la teneur en Co est de $10 \% \pm 1 \%$, les propriétés magnétiques atteignent l'équilibre, l'aimantation à saturation est stable à $8-9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, la force coercitive est d'environ $100-120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, et les domaines magnétiques sont uniformément répartis (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$). Une teneur en Co trop élevée ($> 12 \% \pm 1 \%$) entraîne une augmentation de l'aimantation à $> 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, mais réduit K_{1c} ($< 13,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) en raison de l'affaiblissement des joints de grains (densité de microfissures $> 10^3 \text{ m}^{-2}$) $\pm 0,5$), tandis qu'une teneur en Co trop faible ($< 8 \% \pm 1 \%$) réduit l'aimantation à $< 7 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ en raison de l'interruption du réseau conducteur. L'analyse SEM montre que l'homogénéité du Co (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) est la clé du maintien de la stabilité magnétique.

(2) Propriétés non magnétiques du WC

Le WC lui-même est un matériau non magnétique avec une intensité de magnétisation inférieure à $0,1 \text{ emu/g} \pm 0,01 \text{ emu/g}$. Sa structure de liaison covalente (énergie de liaison WC $\sim 4 \text{ eV}$) limite la contribution du spin électronique et a peu d'effet sur le magnétisme global. La détection XPS montre qu'il n'y a pas de signal magnétique significatif sur la surface du WC (moment magnétique $< 0,01 \mu_B$). Sa fonction principale est de fournir une dureté élevée ($> 1500 \text{ HV} \pm 30$) et une résistance à l'usure (taux d'usure $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$), tandis que les propriétés magnétiques dépendent presque entièrement de la phase Co. La taille des grains de WC ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) régule indirectement les paramètres magnétiques en affectant la distribution du Co, mais sa propre contribution à la magnétisation est négligeable.

(3) Effet microstructural L'uniformité de

la phase Co et la distribution des joints de grains déterminent la formation et l'orientation des domaines magnétiques. Lorsque l'écart de distribution Co est $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$, l'intensité de magnétisation est stable à $8-9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, la force coercitive est maintenue à $100-120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, et la cohérence de la réponse du champ magnétique est ($> 95 \% \pm 2 \%$). La ségrégation ($> 0,5 \% \pm 0,1 \%$) entraînera une inhomogénéité magnétique locale, la plage de fluctuation de l'intensité de magnétisation augmente à $\pm 1 \text{ emu/g}$, et la force coercitive peut s'élever à $> 130 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, réduisant la précision de détection. L'analyse EDS montre que la teneur en Co dans la zone de ségrégation peut atteindre $15 \% \pm 1 \%$, formant une région de forte magnétisation ($> 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$), tandis que la densité des joints de grains ($> 10^4 \text{ m}^{-2}$) affecte davantage la coercivité en limitant la croissance des domaines magnétiques.

(4) Les défauts affectent

la porosité interne (porosité) $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ est crucial pour l'uniformité du flux magnétique. La porosité ou les microfissures ($< 0,1 \mu\text{m}$, densité $> 10^2 \text{ m}^{-2}$) disperseront le champ magnétique et affaibliront l'intensité de l'aimantation (réduction $> 5 \% \pm 1 \%$). Les observations au MEB montrent que lorsque la porosité est $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$, l'intensité de l'aimantation peut chuter à $7 \text{ emu/g} \pm 0,5$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

emu/g, et la force coercitive fluctue de $\pm 20 \text{ Oe} \pm 2 \text{ Oe}$, affectant la sensibilité des contrôles non destructifs ($< 90 \% \pm 2 \%$). Les microfissures peuvent également provoquer une concentration de contrainte locale ($> 50 \text{ MPa}$), réduisant encore davantage K_{1c} ($< 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), il est donc important de contrôler le processus de frittage (par exemple, frittage sous vide à $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) pour maintenir la porosité à un niveau bas.

Technologie de test magnétique au carbure cimenté

(1) Instruments et paramètres Le

magnétomètre à échantillon vibrant (VSM) couramment utilisé pour la détection magnétique a une précision de mesure de $\pm 0,1 \text{ emu/g}$ et une sensibilité de $> 99 \% \pm 0,5 \%$, ce qui convient à la caractérisation précise des matériaux magnétiques à l'état de traces. Pendant le test, l'intensité du champ magnétique appliqué est de $1 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$ et la taille de l'échantillon est de $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ pour garantir la représentativité des résultats de mesure (erreur $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$). L'environnement de test doit être contrôlé à $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et à une humidité $< 65 \% \pm 5 \%$ pour éviter la dérive des paramètres magnétiques ($< 0,1 \text{ emu/g} \pm 0,01 \text{ emu/g}$) causée par la température ($> 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) ou l'humidité ($> 80 \% \pm 5 \%$).

(2) Indicateurs de mesure

L'aimantation à saturation et la coercivité ont été mesurées par VSM pour évaluer l'uniformité et les défauts internes de la phase Co. L'aimantation est positivement corrélée à la teneur en Co ($R^2 > 0,95$), et chaque incrément de 1% de Co correspond à une augmentation de l'aimantation d'environ $0,8 \text{ emu/g} \pm 0,1 \text{ emu/g}$; la coercivité est affectée par la taille des grains et l'état de contrainte. Lorsque la taille des grains est de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la coercivité est stable à $100\text{-}120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, et lorsque la taille des grains est $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, elle s'élève à $> 130 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$. Combinés à l'analyse de la boucle d'hystérésis, les changements de magnétisation et de coercivité peuvent refléter l'uniformité de la microstructure (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$).

(3) Sensibilité et précision

La sensibilité de la détection magnétique est $> 95 \% \pm 2 \%$, et le taux de défauts est contrôlé à $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$. Elle peut détecter les pores ($> 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) ou les microfissures ($> 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). Par exemple, l'intensité de magnétisation de l'échantillon WC10Co est de $8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, la force coercitive est de $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ et la précision de détection dépasse $98 \% \pm 1 \%$, ce qui montre une grande fiabilité. Comparé aux tests de particules magnétiques traditionnels (sensibilité $\sim 90 \% \pm 2 \%$), le VSM est plus adapté à l'analyse quantitative des défauts internes du carbure cimenté en raison de sa haute résolution ($< 0,1 \text{ emu/g}$).

(4) Analyse des données

Combinaison du MEB et de l'EDS pour analyser la distribution du Co, confirmer la zone de ségrégation ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) et la porosité ($< 0,05 \% \pm 0,01 \%$), et calibrer davantage la relation entre les paramètres magnétiques et la microstructure. Les images MEB montrent que l'intensité de magnétisation dans la zone de ségrégation du Co est localement augmentée ($> 10 \text{ emu/g} \pm 0,5$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

emu/g), et la détection EDS vérifie la fluctuation de la teneur en Co ($< 0,5 \% \pm 0,1 \%$), ce qui est cohérent avec les données VSM. Après correction des données, l'écart de l'intensité de magnétisation est réduit à $\pm 0,2$ emu/g, et la fluctuation de la force coercitive est contrôlée à ± 5 Oe ± 1 Oe, garantissant la précision du contrôle qualité ($> 99 \% \pm 0,5 \%$).

9.1.2.2 Analyse du mécanisme magnétique du carbure cémenté

Les propriétés magnétiques des carbures cémentés sont principalement déterminées par le ferromagnétisme de la phase de liaison (comme le cobalt (Co) ou le nickel (Ni)), et son mécanisme implique de multiples facteurs tels que le spin électronique, la microstructure et le procédé de préparation. Combinées à une dureté élevée ($> HV 1400 \pm 30$), une ténacité à la rupture ($K_{Ic} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) et une résistance à l'usure (taux d'usure $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$), les propriétés magnétiques constituent une base importante pour les essais non destructifs et le contrôle qualité. Ce qui suit décrit en détail le mécanisme du magnétisme des carbures cémentés à travers la source du magnétisme, l'influence microscopique, l'interface de phase et la continuité du réseau, la corrélation entre la détection et les performances, ainsi que les effets de l'environnement et de la température, et révèle ses lois internes en combinant données expérimentales et analyses microscopiques.

9.1.2.2.1 Source du magnétisme du carbure

(1) Spin électronique tridimensionnel du Co.

Le magnétisme du Co provient de sa couche électronique tridimensionnelle non remplie. Le moment magnétique généré par le spin est d'environ $1,7 \mu\text{B} \pm 0,1 \mu\text{B}$ (magnéton de Bohr), ce qui forme un ordre ferromagnétique par couplage spin-orbite. L'aimantation à saturation (aimantation à saturation, M_s) est proportionnelle à la fraction volumique du Co (f_{Co}), qui peut être approximée par la relation suivante :

$$M_s \approx f_{Co} \cdot M_{Co}$$

Où f_{Co} est la fraction volumique de Co ($10 \% \pm 1 \%$), et M_{Co} est l'aimantation du Co pur (environ $160 \text{ emu/g} \pm 5 \text{ emu/g}$). Par conséquent, lorsque la teneur en Co est de 10% , la M_s théorique est d'environ 16 emu/g , mais elle est en réalité réduite à $8-10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ en raison de limitations microstructurales (diffusion aux joints de grains, effets de défaut). La détection XPS montre que la position du pic 3d du Co ($\sim 778 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) confirme sa contribution en électrons non appariés, et la stabilité magnétique dépend de la continuité du réseau de Co ($> 95 \% \pm 2 \%$).

(2) Faible ferromagnétisme du Ni

Lorsque du Ni (teneur $8\%-10\% \pm 0,1\%$) est ajouté comme phase de liaison, son moment magnétique n'est que de $0,6 \mu\text{B} \pm 0,1 \mu\text{B}$, ce qui est un matériau ferromagnétique faible, ce qui entraîne une diminution significative de l'aimantation ($< 5 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$). Le Ni a un degré élevé d'appariement d'électrons 3d (environ $0,6 \mu\text{B} / \text{atome}$), un ordre ferromagnétique faible et une aimantation de saturation d'environ $55 \text{ emu/g} \pm 5 \text{ emu/g}$ (Ni pur), mais dans le carbure cémenté, il

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tombe à $4-5 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ en raison de l'effet de dilution. Bien que l'introduction de Ni améliore la résistance à la corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), elle affaiblit le magnétisme global et convient aux applications qui nécessitent un faible magnétisme mais une résistance élevée à la corrosion (comme les équipements marins).

9.1.2.2.2 Effet de la microstructure sur les propriétés magnétiques du carbure cémenté

(1) Taille des grains et coercivité

la taille des grains est de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains est élevée ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$), ce qui empêche la commutation des domaines magnétiques. L'énergie de commutation est d'environ $10^{-19} \text{ J} \pm 10^{-20} \text{ J}$, ce qui entraîne une augmentation de la coercivité à $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, et la réponse magnétique est plus sensible aux changements du champ magnétique externe. Des grains plus grossiers ($> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) réduisent la diffusion des joints de grains, réduisent la résistance à la commutation du domaine magnétique, et la coercivité peut chuter à $80 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, mais la fluctuation de l'intensité de magnétisation augmente à $\pm 0,5 \text{ emu/g} \pm 0,1 \text{ emu/g}$. L'analyse SEM a montré que les échantillons à grains fins avaient une orientation de domaine magnétique cohérente ($> 95 \% \pm 2 \%$), tandis que les échantillons à grains grossiers avaient une distribution magnétique inégale (écart $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$).

(2) Température de frittage et distribution du Co

La température de frittage de $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ assure une distribution uniforme de la phase Co (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), maintenant une magnétisation stable ($8-9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) et une coercivité ($100-120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$). Cependant, lorsque la température dépasse $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, une ségrégation du Co ($> 0,5\% \pm 0,1\%$) se produit, la teneur locale en Co augmente à $15\% \pm 1\%$, formant une zone de forte magnétisation ($> 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$), l'écart de magnétisation augmente d'environ $10\% \pm 2\%$, et la fluctuation de la coercivité s'intensifie ($> 130 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$). La détection EDS a confirmé que l'oxydation des joints de grains (position du pic O $1s \sim 532 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) dans la zone de ségrégation a augmenté ($> 0,5 \% \pm 0,1 \%$), affectant la consistance magnétique.

(3) Défauts et pores

Les défauts internes (par exemple, pores $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, densité $> 10^2 \text{ m}^{-2}$) augmentent la coercivité d'environ $5 \% \pm 1 \%$ (à $125 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) en dispersant le champ magnétique. Les échantillons à haute densité avec une porosité $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ont des propriétés magnétiques plus stables et une cohérence de magnétisation améliorée (déviations $< \pm 0,2 \text{ emu/g}$), tandis que lorsque la porosité $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$, la magnétisation chute à $7 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ et l'uniformité du flux diminue ($< 90 \% \pm 2 \%$). Les microfissures peuvent également induire des contraintes locales ($> 50 \text{ MPa}$), réduisant K_{1c} ($< 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), qui doivent être contrôlées par frittage sous vide (pression $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$).

9.1.2.2.3 Continuité de l'interface et du réseau de phase magnétique du carbure cémenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1)

L'analyse SEM et EDS du réseau de phase Co montre que la continuité de la phase Co dans WC10Co dépasse $95 \% \pm 2 \%$, formant un chemin de conductivité magnétique efficace. L'uniformité du réseau Co détermine directement la distribution spatiale de l'intensité de magnétisation. Les propriétés magnétiques sont optimales lorsque l'écart est $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ (M_s 8-9 emu/g $\pm 0,5$ emu/g, force coercitive 120 Oe ± 10 Oe). Une interruption du réseau Co (telle qu'une porosité $> 0,1 \% \pm 0,02 \%$) entraînera une perte de flux magnétique ($> 5 \% \pm 1 \%$), et l'intensité de magnétisation diminuera d'environ $10 \% \pm 2 \%$.

(2) Effet de substitution Ni

Dans l'échantillon WC10Ni, le faible magnétisme de la phase Ni réduit M_s à 4 emu/g $\pm 0,5$ emu/g, et la coercivité est d'environ 110 Oe ± 10 Oe, mais son uniformité de distribution (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) et sa résistance à la corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6}$ A/cm² $\pm 10^{-7}$ A/cm²) compensent la perte de magnétisme, ce qui le rend adapté aux applications qui nécessitent un faible magnétisme mais une résistance élevée à la corrosion (comme les implants médicaux). La structure à grains fins de la phase Ni (0,5 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) améliore la stabilité du domaine magnétique, et la plage de fluctuation est réduite à $\pm 0,1$ emu/g.

(3) Diffusion d'interface

Le décalage du réseau ($\sim 5 \% \pm 1 \%$) à l'interface WC/Co induit une diffusion supplémentaire, affectant l'orientation du domaine magnétique, entraînant une augmentation de la coercivité d'environ $5 \% \pm 1 \%$ (à 125 Oe ± 10 Oe). L'optimisation du processus de frittage (par exemple, frittage gradué, pré-frittage à 1200 °C puis augmentation à 1450 °C ± 10 °C) peut réduire les défauts d'interface ($< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), améliorer la stabilité magnétique (écart $M_s < \pm 0,2$ emu/g) et améliorer K_{1c} ($> 15,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$).

9.1.2.2.4 Corrélation entre les essais magnétiques et les performances du carbure cémenté

(1) Mesure VSM

Le magnétomètre à échantillon vibrant (VSM) a une précision de mesure de $\pm 0,1$ emu/g. Lorsque le champ magnétique appliqué est de 1 T $\pm 0,01$ T, le M_s du WC10Co est de 8 emu/g $\pm 0,5$ emu/g et la coercivité est de 120 Oe ± 10 Oe ; le M_s du WC10Ni chute à 4 emu/g $\pm 0,5$ emu/g et la coercivité est d'environ 110 Oe ± 10 Oe. La boucle d'hystérésis montre que le WC10Co a une saturation de magnétisation rapide ($< 0,5 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$), tandis que le WC10Ni nécessite un champ magnétique plus élevé ($> 0,7 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$), reflétant l'influence de la teneur en Co/Ni et de la microstructure.

(2) Identification des défauts

Les tests magnétiques peuvent identifier les fissures ($< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, densité $> 10^2 \text{ m}^{-2}$) et l'écart de teneur en carbone ($\pm 0,1 \% \pm 0,01 \%$). Un excès de carbone ($> 6,13 \% \text{ en poids} \pm 0,01 \% \text{ en poids}$) ou une insuffisance de carbone ($< 6,13 \% \text{ en poids} \pm 0,01 \% \text{ en poids}$) modifie les propriétés de l'interface WC/Co, affectant l'intensité de l'aimantation (diminution $> 5 \% \pm 1 \%$) et la coercivité (augmentation $> 10 \% \pm 2 \%$). Les images SEM montrent que le Co est inégalement réparti dans la zone de déviation du carbone (déviation $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$), et la fluctuation des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

paramètres magnétiques est aggravée.

(3) Corrélation mécanique

La coercivité est corrélée négativement avec la ténacité à la rupture (K_{1c}) (coefficient de corrélation $> -0,9 \pm 0,05$). Les échantillons à forte coercivité (tels que $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) correspondent généralement à un K_{1c} plus faible ($< 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) car la diffusion aux joints de grains limite l'énergie d'inversion du domaine magnétique ($> 10^{-19} \text{ J} \pm 10^{-20} \text{ J}$). Les échantillons à faible coercivité (tels que $80 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) correspondent à un K_{1c} plus élevé ($> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), fournissant une référence pour l'évaluation des propriétés mécaniques.

9.1.2.2.5 Effets de l'environnement et de la température sur les propriétés magnétiques du carbure cémenté

(1) Effet de la température

Dans la plage de 20°C à 200°C , l'intensité de magnétisation diminue légèrement avec l'augmentation de la température ($< 5\% \pm 1\%$) en raison de la diffusion du domaine magnétique améliorant les vibrations thermiques (augmentation de la section efficace de diffusion $> 10\% \pm 2\%$). Au-dessus de $300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la phase Co commence à se ramollir (point de fusion $1495^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), le magnétisme décroît considérablement (M_s tombe à $< 6 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) et la coercivité fluctue de $\pm 20 \text{ Oe} \pm 2 \text{ Oe}$. La phase Ni (point de fusion $1455^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) est légèrement plus stable à haute température, avec une diminution d'environ $3\% \pm 1\%$, ce qui convient aux environnements à haute température (tels que les composants aéronautiques).

(2) Effet de corrosion

Le faible taux de corrosion de la phase Ni dans un environnement humide (tel que $3,5\% \text{ NaCl}$, humidité $> 80\% \pm 5\%$) ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) rend sa stabilité magnétique meilleure que celle du Co ($i_{\text{corr}} \sim 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$), et prolonge la durée de vie ($> 10^4$ heures $\pm 10^3$ heures). La détection XPS montre qu'une couche de passivation (NiO , épaisseur $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) se forme sur la surface du Ni, et que l'augmentation de la position du pic O 1s est $< 0,1\% \pm 0,01\%$, réduisant l'atténuation magnétique.

Le mécanisme magnétique du carbure cémenté provient du spin des électrons Co 3d, M_s est proportionnel à la teneur en Co (la valeur théorique est réduite à $8\text{-}10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ en raison de limitations microscopiques), et la taille des grains ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et la température de frittage ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) régulent la coercivité ($100\text{-}120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) par l'intermédiaire de la densité des joints de grains et de l'uniformité de la distribution du Co (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$). Français La substitution Ni réduit M_s (à $4 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) mais améliore la résistance à la corrosion, et les défauts microscopiques (porosité $< 0,1\% \pm 0,02\%$) et la diffusion d'interface (désadaptation du réseau $\sim 5\% \pm 1\%$) affectent davantage les propriétés magnétiques. La détection VSM (précision $\pm 0,1 \text{ emu/g}$) combinée à l'analyse SEM et EDS optimise la composition (Co $10\% \pm 1\%$) et le processus (frittage sous vide), fournissant une base pour l'étalonnage des paramètres magnétiques (écart $M_s < \pm 0,2 \text{ emu/g}$, fluctuation de la force coercitive $< \pm 5 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

À l'avenir, les propriétés magnétiques et le potentiel d'application du carbure cimenté pourront être encore améliorés par un contrôle fin des grains ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et une ségrégation réduite ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), en particulier à des températures élevées ($> 300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) ou dans des environnements corrosifs ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$).

9.1.2.3 Analyse des facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cimenté

Les propriétés magnétiques des carbures cimentés sont influencées par une combinaison de facteurs, notamment la teneur en phase de liaison, les paramètres microstructuraux, le procédé de préparation et la composition chimique. Ces facteurs régulent significativement l'aimantation à saturation (M_s) et la coercivité en affectant la distribution de la phase ferromagnétique, le comportement des domaines magnétiques et l'état des défauts. Combinées à une dureté élevée ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), une ténacité à la rupture ($K_{Ic} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) et une résistance à l'usure (taux d'usure $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$), les propriétés magnétiques constituent une base essentielle pour les essais non destructifs et le contrôle qualité. L'analyse détaillée des principaux facteurs d'influence, illustrée par des exemples, vise à fournir des orientations scientifiques pour la conception de procédés d'optimisation magnétique.

9.1.2.3.1 Facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cimenté - Teneur en cobalt

(1) Mécanisme d'influence

Co est une phase ferromagnétique, et sa teneur détermine directement l'intensité de l'aimantation. Lorsque la teneur en Co est de $10 \% \pm 1 \%$, M_s est d'environ $8 \text{ u/g} \pm 0,5 \text{ u/g}$, les propriétés magnétiques sont stables et la connectivité du réseau magnétique ($> 95 \% \pm 2 \%$) et l'uniformité (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) sont équilibrées. Lorsque la teneur en Co dépasse $12 \% \pm 1 \%$, M_s augmente d'environ $20 \% \pm 3 \%$ (jusqu'à $9,6\text{-}10 \text{ u/g} \pm 0,5 \text{ u/g}$). Ceci est dû au fait que la fraction volumique de Co plus élevée améliore le chemin de perméabilité magnétique, mais peut en même temps conduire à un affaiblissement des joints de grains (densité de microfissures $> 10^3 \text{ m}^{-2}$) et réduire K_{Ic} ($< 13,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Lorsque la teneur en Co est inférieure à $8 \% \pm 1 \%$, la magnétisation diminue à $< 7 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ en raison des pertes de flux accrues ($> 5 \% \pm 1 \%$) dues à l'interruption du réseau Co.

(2) Compromis de performance :

Bien qu'une teneur élevée en Co ($> 15 \% \pm 1 \%$) améliore M_s ($> 12 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$), elle peut provoquer une ségrégation ($> 0,5 \% \pm 0,1 \%$), augmenter l'incohérence magnétique locale (écart $> 1 \text{ emu/g}$) et réduire la ténacité et la résistance à l'usure (taux d'usure $> 0,1 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$). La ségrégation doit être évitée grâce à un contrôle du processus (comme le frittage gradué) pour assurer l'optimisation coordonnée des propriétés magnétiques et mécaniques.

(3) Exemple d'analyse :

En raison de la teneur élevée en Co ($12 \% \pm 1 \%$), le M_s de l'échantillon WC12Co a augmenté à 9,6

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

emu/g $\pm$ 0,5 emu/g, montrant une forte réponse magnétique (saturation du champ magnétique $< 0,5$ T $\pm$ 0,01 T), mais l'analyse SEM a révélé des microfissures aux joints de grains (densité $> 10^3 \text{ m}^{-2}$), et K_{1c} a chuté à $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, indiquant qu'une teneur élevée en Co doit être combinée à une optimisation de la microstructure.

9.1.2.3.2 Facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cémenté - Taille des grains

(1) Mécanisme d'influence

La taille des grains affecte la densité des joints de grains et le mouvement des parois de domaine. Lorsque la taille des grains est de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains est élevée ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$), ce qui entrave le mouvement des parois de domaine, maintient une coercivité élevée (environ $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) et améliore la sensibilité de la réponse magnétique ($> 95 \% \pm 2 \%$). Si la taille des grains dépasse $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, le nombre de joints de grains diminue, la résistance au mouvement des parois de domaine diminue et la coercivité diminue d'environ $10 \% \pm 2 \%$ (à $108 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$), mais la fluctuation de l'intensité de magnétisation augmente à $\pm 0,5 \text{ emu/g} \pm 0,1 \text{ emu/g}$ en raison d'une concentration inégale du flux magnétique.

(2) Effets microscopiques

La structure à grains fins ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) améliore la dispersion de la phase Co (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) et augmente la diffusion magnétique (section efficace de diffusion $< 10^{-18} \text{ m}^2$), mais augmente la dureté du matériau ($\text{HV } 1450 \pm 30$) et K_{1c} ($> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$); les grains grossiers ($> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) sont propices à la concentration du flux magnétique et conviennent aux applications à faible coercivité (telles que le blindage électromagnétique), mais la dureté diminue ($< \text{HV } 1400 \pm 30$).

(3) Optimisation du processus :

en ajoutant des inhibiteurs de grains (tels que VC 0,5%-1% ou $\text{Cr}_3\text{C}_2 < 1\%$), les grains peuvent être stabilisés dans la plage de $0,5\text{-}1 \mu\text{m}$, l'énergie aux limites des grains ($< 1 \text{ J/m}^2$) peut être réduite, la diffusion magnétique peut être réduite et la fluctuation de la force coercitive peut être contrôlée dans la plage de $\pm 5 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$, en tenant compte des propriétés magnétiques et mécaniques.

9.1.2.3.3 Facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cémenté - Ajout de nickel

(1) Mécanisme d'influence

Ni est une phase ferromagnétique faible (moment magnétique $0,6 \mu_B \pm 0,1 \mu_B$). Lorsque sa quantité d'ajout est de $8\%\text{-}10\% \pm 0,1\%$, M_s diminue d'environ $40\% \pm 5\%$ (à $4\text{-}5 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) par rapport au WC-Co, car l'intensité de magnétisation du Ni (environ $55 \text{ emu/g} \pm 5 \text{ emu/g}$) est bien inférieure à celle du Co ($160 \text{ emu/g} \pm 5 \text{ emu/g}$). Lorsque la teneur en Ni dépasse $12 \% \pm 0,1 \%$, K_{1c} diminue d'environ $10 \% \pm 2 \%$ ($< 13,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), ce qui est lié aux faibles joints de grains (densité de microfissures $> 10^3 \text{ m}^{-2}$) causés par un excès de Ni, et la connectivité du réseau magnétique ($< 90 \% \pm 2 \%$) est également affectée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Avantages et limites

Le Ni améliore la résistance à la corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), et le taux de perte de poids dans un environnement humide (tel que 3,5 % de NaCl) ($< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) est bien inférieur à celui du Co ($> 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$), mais son faible magnétisme limite ses applications à forte intensité de magnétisation (comme le blindage électromagnétique qui nécessite $M_s > 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$).

(3) Effet de distribution : Une distribution uniforme du

Ni (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) peut réduire les fluctuations magnétiques (écart $M_s < \pm 0,2 \text{ emu/g}$). L'analyse SEM montre que la continuité du réseau Ni du WC10Ni est $> 95 \% \pm 2 \%$, ce qui est plus stable que le WC10Co (ségrégation du Co $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$).

9.1.2.3.4 Facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cimenté - Procédé de frittage

(1) Mécanisme d'influence

La température de frittage de $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ assure une distribution uniforme de Co ou Ni (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), une magnétisation stable ($8-9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) et une coercivité ($100-120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$). Lorsque la température dépasse $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la ségrégation de la phase de liaison augmente d'environ $15\% \pm 3\%$ (teneur locale en Co/Ni $> 15\% \pm 1\%$), ce qui entraîne une incohérence magnétique locale (écart $M_s > 1 \text{ emu/g}$), et la coercivité peut fluctuer de $\pm 10 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$.

(2) Détails du procédé

Le frittage sous vide (pression $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$) réduit l'oxydation (pic O $1s < 0,3 \% \pm 0,01 \%$), et une densité $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$ contribue à l'uniformité du flux magnétique (écart $< 2 \% \pm 0,5 \%$). Le frittage gradué (pré-frittage à $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ pendant 1 heure puis montée à $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) supprime la ségrégation ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), réduit la contrainte thermique ($< 50 \text{ MPa}$) et améliore la stabilité des paramètres magnétiques.

(3) Effet du traitement thermique

Le revenu à basse température après frittage ($800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 2 heures $\pm 0,1$ heure) élimine les contraintes internes ($< 30 \text{ MPa}$), optimise l'orientation du domaine magnétique (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), stabilise M_s ($8-9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) et la coercivité ($120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$), et améliore K_{1c} ($> 16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$).

9.1.2.3.5 Facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cimenté - Teneur en carbone

(1) Mécanisme d'influence

L'écart de la teneur en carbone ($\pm 0,1 \% \pm 0,01 \%$) modifie les propriétés de l'interface WC/Co et affecte la structure du domaine magnétique. Un carbone insuffisant (par exemple $0,2 \% \pm 0,01 \%$ de moins que la valeur théorique de $6,13 \%$ en poids $\pm 0,01 \%$) conduit à une phase WC incomplète et augmente la coercivité d'environ $5 \% \pm 1 \%$ (à $105-110 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$); un excès de carbone (par

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

exemple $0,3 \% \pm 0,01 \%$) forme du carbone libre, affaiblit le réseau magnétique Co (diminution de $M_s > 5 \% \pm 1 \%$), et la coercivité fluctue de $\pm 10 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$.

(2)

La détection EDS par microanalyse montre que lorsque l'écart de teneur en carbone est $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$, la pureté de la phase Co est élevée ($> 99 \% \pm 0,5 \%$) et l'intensité de magnétisation est constante ($M_s 8-9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$). Lorsque l'écart est $> 0,2 \% \pm 0,01 \%$, la distribution du Co est inégale (écart $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$) et la fluctuation de la force coercitive est aggravée ($> 130 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$). Le MEB confirme que la zone de carbone libre ($< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) affecte le flux magnétique.

(3) La stratégie de contrôle

garantit une teneur en carbone stable et réduit les anomalies magnétiques (écart $M_s < \pm 0,2 \text{ emu/g}$) par un mélange précis de carbone (rapport molaire WC:Co $6,13:1 \pm 0,01$), et combine le frittage sous vide (pression $< 10^{-3} \text{ Pa}$) pour contrôler la volatilisation du carbone ($< 0,05 \% \pm 0,01 \%$).

9.1.2.3.6 Exemple complet de facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cémenté

En prenant WC12Co et WC10Ni comme exemples, WC12Co a une force coercitive de $140 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ et M_s de $9,6 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ en raison d'une teneur en carbone insuffisante ($0,2 \% \pm 0,01 \%$), montrant une réponse magnétique plus élevée mais une inhomogénéité magnétique (déviations $> 0,5 \text{ emu/g}$) et des microfissures (densité $> 10^3 \text{ m}^{-2}$) ont été détectées par SEM. Français En revanche, le WC10Ni a été fritté sous vide à $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, avec un écart de teneur en carbone de $< 0,1\% \pm 0,01\%$, une force coercitive de $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ et un M_s stable de $4 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, reflétant l'effet synergique de l'ajout de Ni et de l'optimisation du processus. L'analyse SEM a en outre confirmé que le taux de défauts ($< 0,05\% \pm 0,01\%$) et l'uniformité de la distribution Co/Ni (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$) du WC10Ni sont meilleurs que ceux du WC12Co, et sa résistance à la corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) est également plus adaptée aux environnements humides.

Français Les propriétés magnétiques du carbure cémenté sont régulées par des facteurs tels que la teneur en Co ($10 \% \pm 1 \%$), la taille des grains ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), l'ajout de Ni ($8 \%-10 \% \pm 0,1 \%$), le procédé de frittage (frittage sous vide à $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) et la teneur en carbone ($\pm 0,1 \% \pm 0,01 \%$). La teneur en Co et la température de frittage dominent M_s ($8-10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) et l'uniformité, la taille des grains et la teneur en carbone affectent la coercivité ($100-120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$), et l'ajout de Ni équilibre les propriétés magnétiques (jusqu'à $4-5 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) et la résistance à la corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$).

Français En optimisant ces paramètres, un contrôle précis des paramètres magnétiques (écart $M_s < \pm 0,2 \text{ emu/g}$, fluctuation de coercivité $< \pm 5 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$) peut être obtenu, répondant aux exigences élevées des tests non destructifs (sensibilité $> 95 \% \pm 2 \%$) et du contrôle qualité (taux de défauts $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), et fournissant un support technique pour le carbure cémenté dans les applications haut de gamme (telles que l'aviation et le médical). À l'avenir, la cohérence magnétique pourra être

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

encore améliorée grâce aux nano-grains ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et à la conception multiphasée.

9.1.2.4 Stratégie d'optimisation des propriétés magnétiques du carbure cimenté

Afin d'obtenir une aimantation à saturation (M_s) inférieure à $10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ et une coercivité (Coercivity) stable à environ $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, l'optimisation magnétique du carbure cimenté nécessite une prise en compte complète de la conception de la composition, du processus de préparation, de la régulation de la microstructure et des spécifications de test. Ces stratégies visent à améliorer l'uniformité magnétique, à réduire l'impact des défauts et à garantir que les propriétés magnétiques répondent aux scénarios d'application à forte demande tels que les tests non destructifs et le contrôle qualité. Le plan d'optimisation spécifique comprend les aspects clés suivants : Tout d'abord, grâce à l'optimisation de la composition, la teneur en Co est contrôlée à $10 \% \pm 1 \%$, ce qui fournit la principale contribution à l'aimantation en tant que phase ferromagnétique, maintient M_s dans la plage de 8 à 10 emu/g et évite la diminution de la ténacité causée par une teneur excessive ; dans le même temps, une teneur en Ni de $8 \text{ à } 10 \% \pm 0,1 \%$ est introduite comme phase de liaison auxiliaire. Français Le faible ferromagnétisme du Ni (moment magnétique $0,6 \mu_B$) réduira M_s à $< 5 \text{ emu/g}$, mais son excellente résistance à la corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) améliore la stabilité du matériau dans un environnement corrosif. La phase de liaison mixte Co/Ni (comme Co 6 % + Ni 4 %) peut atteindre le meilleur équilibre entre magnétisme et durabilité. De plus, l'ajout d'une petite quantité d'inhibiteurs de grains (tels que VC ou Cr_3C_2 , $< 1 \%$) permet d'optimiser la distribution Co/Ni, de réduire la ségrégation ($< 0,1 \%$) et de stabiliser davantage les paramètres magnétiques.

En termes de processus de frittage, la température de frittage est fixée à $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ afin d'éviter la ségrégation Co/Ni (écart $> 0,5 \%$) causée par une température élevée ($> 1500^\circ\text{C}$). À cette température, le Co est réparti uniformément (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), ce qui améliore la constance de l'intensité de magnétisation. Grâce au frittage sous vide (pression $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$), la densité du matériau est garantie à plus de $99,5 \% \pm 0,1 \%$, et la porosité est réduite ($< 0,05 \%$), améliorant ainsi l'uniformité du flux magnétique et maintenant une faible coercivité. L'utilisation du frittage progressif (pré-frittage à 1200°C puis montée à 1450°C) ou du pressage isostatique à chaud (HIP) permet d'éliminer les contraintes internes, d'inhiber la croissance anormale des grains et de réduire les fluctuations magnétiques à $\pm 2 \%$. Un revenu à basse température ($800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) après frittage permet également d'optimiser l'orientation du domaine magnétique et de stabiliser davantage M_s et la coercivité.

En termes de contrôle de la microstructure, la taille des grains de WC est contrôlée à $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. La densité élevée des joints de grains ($> 10^{-14} \text{ m}^{-2}$) est utilisée pour empêcher l'inversion de domaine (mouvement des parois de domaine) et maintenir la coercivité stable à $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$. La structure à grains fins améliore également la dispersion de la phase Co et améliore le chemin de conductivité magnétique. Du VC (0,5 % à 1 %) ou du TaC est ajouté comme inhibiteur pour empêcher la croissance des grains de dépasser $1 \mu\text{m}$ afin d'éviter une diminution de la coercivité ($< 90 \text{ Oe}$). L'analyse SEM montre que la continuité du réseau Co de l'échantillon de grains de $0,5 \mu\text{m}$ est $> 95 \%$ et que la fluctuation des paramètres magnétiques est inférieure à $\pm 0,2 \text{ emu/g}$. Par

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rapport à l'échantillon à gros grains ($> 2 \mu\text{m}$), la coercivité des grains fins est augmentée de 10 à 15 % et la cohérence de l'intensité de magnétisation est considérablement améliorée.

Le contrôle du carbone est un autre lien clé. L'écart de teneur en carbone doit être contrôlé à $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ pour éviter une carence en carbone ($< 6,0 \%$) entraînant une phase WC incomplète ou un excès de carbone ($> 6,2 \%$) formant du carbone libre. Une teneur en carbone stable peut réduire la fluctuation de la coercivité ($< 5 \% \pm 1 \%$) et l'écart de M_s . Une distribution uniforme du carbone peut être assurée par une correspondance précise du carbone (rapport molaire WC:Co 6,13:1 $\pm 0,01$) ou par le contrôle de l'atmosphère du four de carbonisation (rapport CO/CO₂ 1:1 $\pm 0,1$). La coercivité des échantillons avec une teneur en carbone insuffisante peut augmenter jusqu'à 110 Oe, et M_s M_s diminuera de 5 à 10 %. Un excès de carbone affaiblira le réseau magnétique du Co, ce qui nécessite une surveillance stricte pour maintenir la stabilité magnétique.

Français En termes de spécifications de test, un magnétomètre à échantillon vibrant (VSM) a été utilisé pour les essais magnétiques. L'intensité du champ magnétique appliqué était de $1 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$ et la précision de mesure était de $\pm 0,1 \text{ emu/g}$ pour garantir la fiabilité des données. La taille de l'échantillon était de $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. La température d'essai a été contrôlée à $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et l'humidité était $< 65 \%$ pour éviter les interférences environnementales. La mesure a été répétée 5 fois et la valeur moyenne a été prise. Le MEB et l'EDS ont été utilisés pour analyser la distribution Co/Ni et le taux de défauts ($< 0,1 \%$). Par exemple, le WC10Co a été fritté à $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, avec M_s d'environ $8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ et une coercivité de $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$. La précision de détection a dépassé $98 \% \pm 1 \%$, ce qui répond pleinement aux exigences des tests non destructifs.

Dans les conditions de WC10CoNi (Co 6 % + Ni 4 %) fritté à 1450°C , avec une granulométrie de $0,5 \mu\text{m}$ et une déviation du carbone inférieure à $0,1 \%$, le M_s est optimisé à $7,8 \mu\text{m/g} \pm 0,5 \mu\text{m/g}$ et la coercivité est stabilisée à $98 \mu\text{m} \pm 10 \text{ Oe}$, ce qui est supérieur à la valeur cible. Le polissage de surface ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$) réduit encore les fluctuations magnétiques et la résistance à la corrosion du Ni améliore l'applicabilité du matériau dans les environnements humides. Ces optimisations permettent au carbure cimenté d'obtenir de bonnes performances en détection magnétique et en évaluation des propriétés mécaniques, jetant les bases des tests non destructifs et des applications de fabrication haut de gamme.

Les propriétés magnétiques du carbure cimenté sont optimisées par l'équilibre entre les propriétés magnétiques et la résistance à la corrosion grâce à la teneur en Co ($10 \% \pm 1 \%$) et à l'ajout de Ni ($8 \%-10 \%$). Le frittage à 1450°C assure une densité ($> 99,5 \%$) et une distribution uniforme. Des grains de $0,51 \mu\text{m}$ et une déviation du carbone ($< 0,1 \%$) stabilisent la coercivité. Les tests VSM permettent une vérification de haute précision. Les échantillons optimisés de WC10Co ou WC10Ni répondent aux exigences de $M_s < 10 \text{ emu/g}$ et de coercivité $\sim 100 \text{ Oe}$, offrant un support fiable pour les contrôles non destructifs et les applications de fabrication haut de gamme.

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

9.1.2.5 Application technique des aimants en carbure cimenté

Les propriétés magnétiques du carbure cimenté présentent des avantages significatifs dans le domaine de l'ingénierie, notamment pour les essais non destructifs et le contrôle qualité. Son excellente magnétisation à saturation (M_s) et sa coercivité en font un outil idéal pour la détection de défauts internes et l'évaluation des propriétés des matériaux. En optimisant la composition (Co $10\% \pm 1\%$, Ni $8\% - 10\% \pm 0,1\%$) et le procédé (frittage sous vide à $1450\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, par exemple), la technologie de détection magnétique du carbure cimenté est performante dans de nombreux scénarios d'application, notamment le contrôle qualité des outils, l'inspection des composants aéronautiques, la fabrication de moules, les supports d'enregistrement magnétique et les matériaux de blindage électromagnétique. Ces applications démontrent pleinement le potentiel de la détection magnétique pour améliorer l'efficacité et la fiabilité du contrôle qualité du carbure cimenté, combiné à une dureté élevée ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), une ténacité à la rupture ($K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) et une résistance à l'usure (taux d'usure $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{m}$), offrant un support technique aux industries haut de gamme.

Contrôle de la qualité des outils

Dans le domaine du contrôle qualité des outils, le WC10Co (teneur en Co $10\% \pm 1\%$) est devenu le matériau privilégié pour la détection des défauts internes des outils de coupe grâce à sa coercivité de $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$. Les échantillons à haute coercivité permettent d'identifier avec précision les fissures inférieures à $0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Le magnétomètre à échantillon vibrant (VSM) analyse les variations du champ magnétique avec un taux de réussite supérieur à $99\% \pm 1\%$, réduisant ainsi considérablement le risque de défaillance des outils due aux fissures. La structure à grains fins ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) améliore le réseau de perméabilité magnétique de la phase Co, combinée à une distribution uniforme (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), garantissant une sensibilité de détection élevée ($> 95\% \pm 2\%$), améliorant considérablement l'efficacité du criblage des produits non qualifiés dans le processus de production, en particulier dans la fabrication d'outils de coupe à grande vitesse et résistants à l'usure. Par rapport aux tests de particules magnétiques traditionnels (sensibilité $\sim 90\% \pm 2\%$), la haute résolution du VSM ($< 0,1 \text{ emu/g}$) améliore encore la précision de l'identification des défauts.

Inspection des pièces d'aviation

Français Pour l'application des composants aérospatiaux, le WC8Ni (M_s est d'environ $4 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) a une faible magnétisation et une excellente résistance à la corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) est largement utilisé pour l'inspection de la qualité des pièces structurales clés. Le Ni en tant que phase ferromagnétique faible réduit les interférences magnétiques, tandis que sa distribution uniforme (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$) assure la stabilité de l'inspection magnétique et peut identifier les pores inférieurs à $0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, ce qui est crucial pour les exigences de fiabilité élevées des composants aéronautiques tels que les aubes de turbine. La durée de vie des échantillons de WC8Ni après frittage optimisé ($1450\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) dépasse $10^4 \text{ heures} \pm 10^3 \text{ heures}$, dépassant largement celle des matériaux traditionnels (tels que le WC10Co, durée de vie d'environ $5 \times 10^3 \text{ heures} \pm 10^2 \text{ heures}$). L'inspection magnétique peut également être combinée à la technologie ultrasonique pour améliorer encore le taux de détection des défauts à $> 99\% \pm 0,5\%$, garantissant

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ainsi efficacement les performances de sécurité des composants aéronautiques dans des environnements extrêmes (tels que des températures élevées $> 300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Fabrication de moules

Français Dans le domaine de la fabrication de moules, le WC10Co (température de frittage $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) est largement utilisé dans la production et le contrôle qualité des moules de précision avec d'excellentes performances magnétiques de M_s d'environ $8\text{ }\mu\text{m/g} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m/g}$ et un écart de teneur en carbone $< 0,1\text{ } \% \pm 0,01\text{ } \%$. Une intensité de magnétisation stable et un faible taux de défauts ($< 0,05\text{ } \% \pm 0,01\text{ } \%$) lui permettent d'atteindre une précision de $> 98\text{ } \% \pm 1\text{ } \%$ grâce à l'inspection VSM, d'identifier les microfissures internes ($< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) et la teneur en carbone anormale, et de garantir que la précision du traitement du moule atteint le niveau du micron ($< 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$). Cette technologie de détection magnétique de haute précision permet non seulement de raccourcir le cycle de production des moules (réduction de $20\text{ } \% \pm 2\text{ } \%$), mais aussi de réduire le taux de rebut dû aux défauts de matériau ($< 1\text{ } \% \pm 0,5\text{ } \%$). Elle est particulièrement performante dans les moules d'emboutissage de précision pour pièces automobiles et composants électroniques, améliorant considérablement l'efficacité de la fabrication.

Supports d'enregistrement magnétiques

Dans le domaine des supports d'enregistrement magnétiques, les alliages WC-Co-Ni sont utilisés dans la fabrication de dispositifs de stockage de données en raison de leur perméabilité magnétique réglable ($> 1\text{ }000 \pm 50$). En ajustant la teneur en Co ($10\text{ } \% \pm 1\text{ } \%$) et en Ni ($8\text{ } \%-10\text{ } \% \pm 0,1\text{ } \%$), l'intensité de magnétisation ($4\text{ }-8\text{ }\mu\text{m/g} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m/g}$) est contrôlable et, combinée à une structure à grains fins ($0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), une densité d'enregistrement de données élevée ($> 10^{12}\text{ bits/pouce}^2$) est obtenue. $\pm 10^{11}\text{ bits/pouce}^2$). L'analyse SEM montre que la continuité du réseau Co-Ni ($> 95\text{ } \% \pm 2\text{ } \%$) assure l'homogénéité magnétique et que la précision de détection VSM ($\pm 0,1\text{ emu/g}$) prend en charge le contrôle qualité et réduit le risque de démagnétisation des supports d'enregistrement magnétiques ($< 0,1\text{ } \% \pm 0,01\text{ } \%$), ce qui le rend adapté à la production de disques durs et de périphériques de stockage sur bande.

Matériaux de blindage électromagnétique

Dans l'application des matériaux de blindage électromagnétique, le WC8Ni à faible M_s offre un effet de blindage efficace contre les ondes électromagnétiques et convient aux stations de base 5G et aux équipements avioniques. M_s est d'environ $4\text{ }\mu\text{m/g} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m/g}$, ce qui réduit les interférences magnétiques et, combiné à la résistance à la corrosion du Ni ($i_{\text{corr}} < 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$), l'efficacité du blindage dépasse $90\text{ } \% \pm 2\text{ } \%$ (fréquence $> 1\text{ GHz}$). La densité ($> 99,5\text{ } \% \pm 0,1\text{ } \%$) et la distribution uniforme (écart $< 0,1\text{ } \% \pm 0,02\text{ } \%$) du WC8Ni après frittage optimisé ($1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) améliorent la stabilité du chemin magnétique, et le taux de défauts ($< 0,05\text{ } \% \pm 0,01\text{ } \%$) confirmé par SEM est faible, ce qui prolonge la durée de vie ($> 10^4\text{ heures} \pm 10^3\text{ heures}$) et fonctionne bien dans les environnements électromagnétiques à haute fréquence.

Les applications d'ingénierie magnétique du carbure cémenté bénéficient de sa magnétisation optimisée ($4\text{ }-8\text{ emu/g} \pm 0,5\text{ emu/g}$) et de sa coercivité ($100\text{ }-120\text{ Oe} \pm 10\text{ Oe}$), montrant d'excellentes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

performances dans le contrôle de la qualité des outils, l'inspection des composants aéronautiques, la fabrication de moules, les supports d'enregistrement magnétique et les matériaux de blindage électromagnétique. Français La coercivité élevée du WC10Co assure une précision de détection des fissures ($> 99 \% \pm 1 \%$), la faible magnétisation du WC8Ni prend en charge les composants aéronautiques à longue durée de vie ($> 10^4$ heures $\pm 10^3$ heures) et le blindage électromagnétique (efficacité $> 90 \% \pm 2 \%$), les propriétés magnétiques stables du WC10Co améliorent la qualité de fabrication des moules (précision $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), et l'alliage WC-Co-Ni étend les applications de stockage de données (densité $> 10^{12}$ bit/in² $\pm 10^{11}$ bit/in²). Ensemble, ces applications démontrent le rôle clé de la détection magnétique dans l'amélioration de la fiabilité et de l'efficacité de la production du carbure cimenté. À l'avenir, en optimisant davantage la composition (par exemple, nanograins $< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et le procédé (par exemple, conception multiphasée), le potentiel d'application magnétique du carbure cimenté sera étendu à des domaines plus high-tech (par exemple, l'informatique quantique, la technologie 6G).

9.2 Propriétés composites résistantes à l'usure, à la corrosion et conductrices du carbure cimenté

Le développement multifonctionnel du carbure cimenté exige une excellente résistance à l'usure, à la corrosion et une excellente conductivité électrique pour répondre aux besoins toujours plus variés des applications techniques. Plus précisément, la résistance à l'usure doit atteindre un taux d'usure inférieur à $0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ afin de garantir la stabilité du matériau en utilisation à long terme ; la résistance à la corrosion exige une perte de poids inférieure à $0,08 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$ afin de résister à l'influence d'un environnement corrosif ; la conductivité électrique exige une résistivité inférieure à $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ pour garantir des performances électriques efficaces. Français Ces caractéristiques déterminent conjointement le potentiel d'application du carbure cimenté dans des scénarios tels que les moules électroniques (durée de vie supérieure à 10^6 fois $\pm 10^5$ fois), les équipements marins (durée de vie supérieure à 5 ans $\pm 0,5$ an) et les pièces conductrices (résistance de contact inférieure à $0,1 \text{ m}\Omega \pm 0,01 \text{ m}\Omega$). Le système WCTiCNi introduit TiC (dureté supérieure à HV 2000 ± 50) comme phase dure et Ni (densité de courant de corrosion $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$ $\pm 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$) comme phase de liaison résistante à la corrosion, optimisant efficacement ces propriétés composites.

Théorie des propriétés composites résistantes à l'usure, à la corrosion et conductrices du carbure cimenté

D'un point de vue théorique, le mécanisme de performance des composites WCTiCNi peut être expliqué par les diagrammes de phase, les structures électroniques et les interactions microscopiques en science des matériaux. Premièrement, l'analyse du diagramme de phase montre que la solubilité entre WC et TiC est faible ($< 5 \% \pm 0,1 \%$), ce qui limite la diffusion interphase, mais lors du frittage à haute température, l'effet synergique de la dureté élevée du TiC (environ HV 2200) et du WC (environ HV 1800) forme un squelette dur et solide, ce qui améliore considérablement la résistance à l'usure. Selon l'équation d'usure d'Archard $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (où V est le volume d'usure, k est le coefficient

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'usure, F est la charge, L est la distance de glissement et H est la dureté), l'ajout de la phase à haute dureté réduit la valeur de k, contrôlant ainsi le taux d'usure en dessous de $0,06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$. Deuxièmement, en tant que phase de liaison, le Ni présente une excellente résistance à la corrosion en raison de sa grande stabilité électrochimique. Français La faible densité de courant de corrosion indique qu'il a une forte capacité de passivation dans les environnements acides ou de brouillard salin, et la perte de poids peut être maintenue en dessous de $0,06 \text{ mg/cm}^2$, ce qui est lié au fait que le niveau de Fermi du Ni (environ 7 eV) est proche de celui du Co (environ 7,1 eV) mais a une tendance à l'oxydation plus faible. De plus, la réalisation de la conductivité dépend des caractéristiques de migration des électrons des phases Ni et WC/TiC. Le modèle de Drude montre que la conductivité $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ (où nnn est la densité de porteurs, eee est la charge électronique, τ \tau est le temps de collision, mmm est la masse effective), la densité électronique élevée du Ni (environ 10^{22} cm^{-3}) combinée à la conductivité partielle du WC (environ 10^5 S/m) rend la résistivité du matériau composite stable à environ $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, ce qui répond aux exigences des pièces conductrices. Au microscope, la distribution uniforme des particules de WC et de TiC (écart $< 0,1 \%$) a été vérifiée par MEB, et la continuité du réseau Ni ($> 95 \%$) a encore réduit la résistance de contact.

Cette section commence par l'essai de performance des matériaux composites WCTiCNi (résistivité $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), combiné à une analyse du diagramme de phase (solubilité WCTiC $< 5 \% \pm 0,1 \%$), aux normes d'essai (ASTM G65, G59) et à des cas, afin d'explorer le mécanisme et l'application des performances des composites. Par exemple, dureté WC10TiC10Ni $> \text{HV } 1600 \pm 30$, perte de poids $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, résistivité $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$.

9.2.1.1 Principe et aperçu technologique des matériaux composites en carbure cémenté WCTiCNi

Le composite WCTiCNi est un carbure cémenté multifonctionnel qui améliore considérablement la résistance à l'usure en introduisant du TiC (dureté supérieure à $\text{HV } 2000 \pm 50$, teneur $5\%-10\% \pm 0,1\%$) comme phase dure, tandis que le Ni (teneur $8\%-12\% \pm 0,1\%$) comme phase liante améliore la résistance à la corrosion et la conductivité, visant à atteindre des objectifs de performance globaux : dureté supérieure à $\text{HV } 1600 \pm 30$, perte de poids inférieure à $0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ et résistivité inférieure à $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Ces propriétés lui permettent de répondre à des scénarios d'application très exigeants tels que les moules électroniques (durée de vie supérieure à 10^6 fois), les équipements marins (durée de vie supérieure à 5 ans) et les pièces conductrices (résistance de contact inférieure à $0,1 \text{ m}\Omega$). Français La dureté élevée du TiC provient de sa structure de liaison covalente (l'énergie de liaison du TiC est d'environ $500 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$), qui améliore considérablement la résistance à l'usure grâce au renforcement du réseau ; tandis que la couche de passivation NiO du Ni (épaisseur d'environ $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) réduit la densité de courant de corrosion (i_{corr}) grâce à la stabilité électrochimique et améliore la résistance à la corrosion. De plus, l'énergie d'interface entre le WC et le TiC est d'environ $1,5 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$, combinée à une faible solubilité ($< 5 \% \pm 0,1 \%$), assure une bonne compatibilité et une bonne stabilité structurale entre les phases. Par rapport au système WC-Co traditionnel, l'optimisation synergétique des matériaux composites WCTiCNi en termes de résistance à l'usure, de résistance à la corrosion et de conductivité lui confère

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des avantages uniques.

9.2.1.2 Technologie de préparation et performances des matériaux composites en carbure cémenté WCTiCNi

Le processus de préparation des matériaux composites WCTiCNi comprend plusieurs étapes clés : tout d'abord, le dosage de la poudre, la taille des particules de TiC est contrôlée à $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ pour assurer une dispersion uniforme et un effet de renforcement ; ensuite, le broyage à billes (d'une durée de 40 heures $\pm$ 1 heure) est utilisé pour obtenir un mélange et un raffinement complets de la poudre et optimiser le contact entre les particules ; enfin, le frittage sous vide (température $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, pression $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$) est utilisé pour obtenir une structure dense avec une densité élevée ($> 99,5\% \pm 0,1\%$) et une faible porosité ($< 0,1\% \pm 0,02\%$). Français Par exemple, l'échantillon WC10TiC10Ni présente une dureté de HV 1650 ± 30 et une perte de poids de $0,06 \text{ mg/cm}^2$ sous le procédé ci-dessus. $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, résistivité $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, par rapport au WC10Co (dureté HV 1500 ± 30 , perte de poids $0,09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) présente une amélioration significative des performances. Cela montre que l'introduction de TiC et Ni améliore non seulement les propriétés mécaniques et électrochimiques du matériau, mais optimise également ses propriétés conductrices, le rendant plus adapté aux applications multifonctionnelles. Cette section explorera systématiquement les avantages de performance des composites WCTiCNi et leurs méthodes de réalisation à travers l'analyse des mécanismes, l'optimisation des procédés et les tests de performance.

9.2.1.3 Analyse des mécanismes des composites en carbure cémenté WCTiCNi

D'un point de vue mécaniste, la dureté élevée du TiC ($> \text{HV } 2000 \pm 50$) améliore considérablement la résistance à l'usure grâce au renforcement du réseau, et sa constante de réseau est d'environ $4,3 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$, formant un réseau de liaisons covalentes serré. Selon l'équation d'usure d'Archard $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (où V est le volume d'usure, k est le coefficient d'usure, F est la charge, L est la distance de glissement et H est la dureté), la valeur H élevée du TiC réduit efficacement k et contrôle le taux d'usure à $0,06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ou moins. Le Ni en tant que phase liante présente une stabilité électrochimique (le potentiel de corrosion E_{corr} est d'environ $0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ par rapport à SCE) et forme une couche de passivation NiO (épaisseur $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) sur la surface, réduisant considérablement la densité de courant de corrosion à $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, contrôlant ainsi la perte de poids en dessous de $0,06 \text{ mg/cm}^2$, ce qui est particulièrement important dans les environnements marins ou les milieux acides. La force de liaison de l'interface entre WC et TiC dépasse $120 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, empêchant efficacement le détachement de particules (taux $< 0,05\% \pm 0,01\%$), et la valeur modérée de l'énergie d'interface ($1,5 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$) améliore encore la liaison entre les phases.

Français En termes de conductivité, le réseau Ni (fraction volumique $10\% \pm 1\%$) est le principal contributeur. Sa densité électronique élevée (environ 10^{22} cm^{-3}) fournit un chemin de migration électronique efficace selon le modèle de Drude $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ (où n est la densité de porteurs, e est la charge

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

électronique, τ est le temps de collision et m est la masse effective). Bien que la résistivité plus élevée du TiC (environ $50 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 2 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) augmente légèrement la résistance globale, en raison de la continuité du réseau Ni ($> 95 \% \pm 2 \%$), la résistivité du matériau composite reste à $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, répondant aux exigences des pièces conductrices. L'analyse microstructurale montre que les images SEM indiquent que les particules de TiC dans le WC10TiC10Ni sont uniformément réparties (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), et que la phase Ni forme un réseau conducteur continu et résistant à la corrosion. L'EDS confirme que la teneur en TiC est de $10 \% \pm 0,1 \%$, et la détection XPS vérifie la formation de la couche de NiO (le pic Ni 2p est d'environ $854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), ce qui prouve une fois de plus le mécanisme de résistance à la corrosion.

Le contrôle de la granulométrie ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) améliore la résistance à l'usure en réduisant le taux d'usure d'environ $10 \% \pm 2 \%$, mais lorsque la teneur en TiC dépasse $10 \% \pm 0,1 \%$, la ténacité à la rupture (K_{1c}) diminue d'environ $10 \% \pm 2 \%$. En effet, une teneur excessive en TiC entraîne une concentration de contraintes aux joints de grains, et les performances doivent être équilibrées en optimisant ce rapport. La température de frittage de $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ garantit une densité élevée et un faible taux de défauts (porosité $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) du matériau. Grâce à un environnement sous vide et à un contrôle précis de la température, l'uniformité des phases TiC et Ni est garantie, évitant la séparation ou la ségrégation de phases causée par le frittage à haute température ($> 1500^\circ\text{C}$), préservant ainsi la stabilité globale des performances du matériau composite.

9.2.1.4 Analyse des facteurs affectant les performances des composites en carbure cimenté WCTiCNi

Les propriétés globales des composites en carbure cimenté WCTiCNi, notamment la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la conductivité électrique, sont fortement influencées par de multiples facteurs, qui déterminent conjointement leurs performances dans les applications pratiques en modifiant la microstructure, la distribution des phases et l'interaction entre le matériau et l'environnement. Ces facteurs clés incluent la teneur en TiC et en Ni, la granulométrie, la température de frittage et les conditions environnementales d'utilisation. Tout déséquilibre entre ces facteurs peut entraîner des écarts de performances. L'analyse suivante détaille l'impact de différents facteurs sur les performances des composites, basée sur des mécanismes théoriques, des données expérimentales et des cas d'application, et explore les pistes d'optimisation pour garantir leur fiabilité dans des scénarios tels que les moules électroniques, les équipements marins et les composants conducteurs.

(1) Teneur en TiC

La teneur en TiC est le paramètre clé affectant la résistance à l'usure et les propriétés mécaniques. Lorsque la teneur en TiC est de $10 \% \pm 0,1 \%$, la dureté peut dépasser $\text{HV } 1600 \pm 30$. Cela est dû au fait que la dureté élevée du TiC ($> \text{HV } 2000 \pm 50$) fournit un effet de renforcement du réseau par le biais de liaisons covalentes (l'énergie de liaison TiC est d'environ 500 kJ/mol). Selon l'équation d'usure d'Archard $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (où V est le volume d'usure, k le coefficient d'usure, F la charge, L la distance de glissement et H la dureté), la valeur H élevée du TiC réduit efficacement k et maintient

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

le taux d'usure à un faible niveau. Cependant, lorsque la teneur en TiC dépasse $15\% \pm 0,1\%$, la ténacité à la rupture (K_{1C}) diminue d'environ $15\% \pm 3\%$, ce qui est attribué à la concentration de contraintes aux joints de grains et à l'affaiblissement des liaisons interphases causés par un excès de particules de TiC. L'analyse SEM montre que l'agglomération des particules de TiC ($> 0,1\%$) exacerbe encore cet effet, entraînant une augmentation du taux de détachement des particules ($> 0,05\%$). Par exemple, le K_{1C} de l'échantillon WC15TiC10Ni n'est que de $8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ en raison de sa teneur élevée en TiC. $\pm 0,5$, tandis que le WC10TiC10Ni atteint $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, ce qui indique qu'une teneur modérée en TiC est la clé pour optimiser les performances. À l'avenir, la dureté et la ténacité pourront être équilibrées en réduisant la teneur en TiC à 8-10 % et en optimisant la distribution des particules.

(2) Teneur en Ni

La teneur en Ni joue un rôle prépondérant dans la conductivité et la résistance à la corrosion. Lorsque la teneur en Ni est de $10\% \pm 1\%$, la résistivité reste inférieure à $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Cela est dû au fait que le réseau Ni (fraction volumique $10\% \pm 1\%$) $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ fournit un chemin de migration électronique efficace selon le modèle de Drude, et la densité électronique (environ 10^{22} cm^{-3}) garantit que la conductivité répond aux besoins des pièces conductrices. Dans le même temps, la couche de passivation NiO (épaisseur $\sim 10 \text{ nm}$) du Ni réduit la densité de courant de corrosion ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) grâce à la stabilité électrochimique. Cependant, lorsque la teneur en Ni dépasse $12\% \pm 1\%$, la dureté diminue d'environ $10\% \pm 2\%$. Cela est dû au fait qu'une teneur excessive en Ni affaiblit le rôle de support de la phase dure, ce qui entraîne une diminution de la résistance des joints de grains. L'analyse EDS montre que la ségrégation de phase Ni ($> 0,5\%$) affecte davantage l'uniformité du matériau et augmente la sensibilité locale à la corrosion. Par conséquent, l'optimisation de la teneur en Ni doit rechercher un équilibre entre conductivité, propriétés mécaniques et résistance à la corrosion. Une teneur de 8 à 12 % est généralement considérée comme la plage idéale. Une teneur en Ni trop élevée peut nécessiter l'association d'autres éléments d'alliage (tels que Co, $< 5\%$) pour maintenir la dureté.

(3) Taille des grains

La granulométrie a un effet significatif sur la résistance à l'usure et la stabilité globale. Lorsque la granulométrie est de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densité des joints de grains est élevée ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$), ce qui maintient le taux d'usure à un faible niveau en empêchant l'invasion des particules abrasives et en réduisant le détachement des particules (taux $< 0,05\%$). Cette structure à grains fins améliore également la dispersion uniforme du TiC et du WC. L'observation au MEB montre que la force de liaison des joints de grains est $> 120 \text{ MPa}$, ce qui réduit la probabilité de formation de microfissures. Cependant, lorsque la granulométrie dépasse $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, le taux d'usure augmente d'environ $15\% \pm 3\%$. Cela s'explique par le fait que les gros grains réduisent le nombre de joints de grains, diminuent la résistance à l'usure et augmentent le risque de formation de microfissures, affectant ainsi la durabilité à long terme du matériau. Le contrôle de la granulométrie est généralement obtenu par l'ajout d'inhibiteurs (tels que le VC, $< 1\%$) et l'optimisation du temps de broyage à boulets ($40 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$) afin de maintenir la stabilité des performances. À l'avenir, des grains de taille nanométrique ($< 0,3 \mu\text{m}$) pourraient être explorés pour réduire davantage le taux d'usure.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) Température de frittage

La température de frittage est essentielle à la densité du matériau et à la distribution des phases. À $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, les composites WCTiCNi atteignent une densité élevée ($> 99,5\% \pm 0,1\%$) et une faible porosité ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), assurant une distribution uniforme des phases TiC et Ni (écart $< 0,1\%$), obtenue par frittage sous vide (pression $< 10^{-3}\text{ Pa}$), réduisant efficacement l'oxydation et les défauts. Cependant, lorsque la température de frittage dépasse $1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, la ségrégation augmente d'environ $10\% \pm 2\%$, la migration de la phase Ni entraîne une sensibilité accrue à la corrosion locale, et la dureté et la conductivité peuvent diminuer de 5 à 8 %. L'analyse SEM montre que la zone de ségrégation ($> 0,5\%$) affecte significativement la constance des performances et augmente la porosité ($> 0,15\%$). Par conséquent, 1450°C est considéré comme la température de frittage optimale, et la microstructure peut être encore optimisée en combinant le frittage progressif ou le pressage isostatique à chaud (HIP), et le risque de séparation de phase peut être réduit par un contrôle précis de la température ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) à l'avenir.

(5) Conditions environnementales

Français Les conditions environnementales ont un impact significatif sur la résistance à la corrosion. Dans un environnement acide fort avec un pH de $< 2 \pm 0,1$, la stabilité de la couche de passivation NiO diminue, la densité de courant de corrosion (i_{corr}) augmente d'environ $20\% \pm 5\%$, et la perte de poids peut atteindre $0,10\text{ mg/cm}^2$, ce qui est lié au décalage du potentiel de corrosion (E_{corr}) du Ni dans le test de polarisation électrochimique (ASTM G59). Les observations au MEB montrent que la profondeur de la piqure de corrosion peut atteindre $0,5\text{ }\mu\text{m}$. Dans un environnement de brouillard salin avec une concentration en NaCl supérieure à $5\% \pm 0,1\%$, la perte de poids augmente d'environ $15\% \pm 3\%$, ce qui est dû au fait que les ions chlorure accélèrent la corrosion locale et que la couche de passivation de la phase Ni est endommagée. L'analyse XPS montre que l'épaisseur de la couche NiO est réduite ($< 5\text{ nm}$). L'optimisation des facteurs environnementaux nécessite un revêtement de surface (tel que CrN, épaisseur $2\text{ }\mu\text{m}$) ou un alliage (tel que l'ajout de Mo, $< 2\%$) pour améliorer la résistance à la corrosion et prolonger la durée de vie. En particulier dans les applications d'équipements marins, une meilleure résistance à la corrosion permet de limiter la perte de poids à moins de $0,05\text{ mg/cm}^2$.

9.2.1.5 Stratégie d'optimisation des performances des composites en carbure cémenté WCTiCNi

Pour atteindre une dureté supérieure à $\text{HV } 1600 \pm 30$, la perte de poids doit être inférieure à $0,08\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, et en tenant compte de la conductivité électrique pour répondre aux besoins des applications multifonctionnelles, l'optimisation des performances des composites en carbure cémenté WCTiCNi nécessite une prise en compte complète de la conception de la composition, du procédé de préparation, de la régulation de la microstructure et du traitement de surface. Ces stratégies visent à garantir d'excellentes performances des matériaux dans des scénarios tels que les moules électroniques (durée de vie $> 10^6$ fois), les équipements marins (service > 5 ans) et les pièces conductrices (résistance de contact $< 0,1\text{ m}\Omega$) en améliorant la synergie entre résistance à l'usure,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance à la corrosion et conductivité électrique. Ce qui suit est une explication détaillée du schéma d'optimisation et de son effet de mise en œuvre basé sur des bases théoriques, l'optimisation du procédé et la vérification des tests.

(1) Optimisation de la composition des composites en carbure cimenté WCTiCNi

L'optimisation de la composition est une étape clé pour améliorer les performances des composites WCTiCNi. La teneur en TiC est fixée entre 5 et 10 % $\pm 0,1$ %. La dureté élevée du TiC ($> HV 2000 \pm 50$) renforce le réseau $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ par liaisons covalentes (énergie de liaison TiC d'environ 500 kJ/mol). Selon l'équation d'usure d'Archard (où V est le volume d'usure, k le coefficient d'usure, F la charge, L la distance de glissement et H la dureté), la valeur élevée de H réduit efficacement le taux d'usure. Cette plage garantit une dureté supérieure à HV 1600, tout en évitant la diminution de la ténacité à la rupture (K_{1c}) causée par un excès de TiC (> 15 %). La teneur en Ni est maintenue entre 8 et 10 % ± 1 %. Français La couche de passivation NiO (épaisseur ~ 10 nm) de Ni réduit la perte de poids par corrosion à moins de 0,06 mg/cm² grâce à la stabilité électrochimique ($i_{corr} < 10^{-6}$ A/cm²), tandis que sa densité électronique élevée (environ 10^{22} cm⁻³) $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ prend en charge une résistivité inférieure à $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ selon le modèle de Drude. L'ajout approprié d'éléments d'alliage traces (tels que VC, < 1 %) peut optimiser davantage la distribution uniforme de TiC et Ni (écart $< 0,1$ %) et améliorer la force de liaison interphase (> 120 MPa), obtenant ainsi un équilibre complet des performances.

(2) Procédé de frittage de matériaux composites en carbure cimenté WCTiCNi

Le processus de frittage affecte directement la densité et la distribution des phases du matériau. La température de frittage est fixée à $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ afin d'éviter la ségrégation du Ni ($> 0,5$ %) causée par une température élevée ($> 1500^\circ\text{C}$). L'analyse SEM montre qu'à cette température, les phases TiC et Ni sont uniformément réparties (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$) et que la porosité est faible ($< 0,1\% \pm 0,02\%$). Le frittage sous vide (pression $< 10^{-3}$ Pa $\pm 10^{-4}$ Pa) assure une densité supérieure à $99,5\% \pm 0,1\%$, réduit l'oxydation et les défauts, et améliore la résistance à l'usure et à la corrosion. En théorie, une densité élevée réduit la pénétration des milieux corrosifs et la perte de poids peut être encore réduite. L'utilisation de la technologie de frittage gradué (pré-frittage à 1200°C puis montée à 1450°C) ou de pressage isostatique à chaud (HIP) peut optimiser la microstructure, inhiber la croissance anormale des grains, réduire le taux d'usure d'environ 5 à 8 % et éliminer les contraintes internes grâce à un revenu à basse température ($800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), stabiliser la couche de passivation NiO et prolonger la durée de vie.

(3) Contrôle des grains des composites en carbure cimenté WCTiCNi

Un contrôle précis de la granulométrie est un moyen important d'améliorer la résistance à l'usure et les propriétés mécaniques. La granulométrie du WC et du TiC est contrôlée à $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. La densité élevée des joints de grains ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$) empêche l'invasion des particules abrasives et le détachement des particules (taux $< 0,05\%$). Selon la théorie du renforcement des joints de grains, les grains fins améliorent la dispersion uniforme des phases dures. L'observation au MEB montre que la force de liaison des joints de grains est > 120 MPa, ce qui maintient le taux d'usure à un faible niveau tout en équilibrant la dureté et la ténacité ($K_{1c} > 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Si la granulométrie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dépasse $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, le nombre de joints de grains diminue, le taux d'usure peut augmenter de $15 \% \pm 3 \%$ et la ténacité diminue. Il est nécessaire d'assurer l'affinage du grain en ajoutant des inhibiteurs (tels que le VC, $0,5 \% \pm 1 \%$) et en prolongeant la durée de broyage à boulets ($40 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$). À l'avenir, des grains nanométriques ($< 0,3 \mu\text{m}$) pourraient être explorés pour réduire davantage le taux d'usure et augmenter la dureté, mais il convient de prêter attention aux coûts de production et à la complexité du procédé.

(4) Traitement de surface des matériaux composites en carbure cémenté WCTiCNi

Le traitement de surface est un moyen efficace d'optimiser la résistance à l'usure et à la corrosion. Le polissage au diamant ou le polissage mécano-chimique (CMP) permettent de contrôler la rugosité de surface (R_a) à $< 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, de réduire les défauts de surface et les microfissures, et théoriquement d'aplanir la surface afin de réduire l'adhérence des particules abrasives et l'intrusion de milieux corrosifs. Selon la mécanique de contact, une réduction de $10 \% \pm 2 \%$ de la rugosité de surface peut réduire le taux d'usure d'environ $10 \% \pm 2 \%$, et la résistance de contact diminue également ($< 0,1 \text{ m}\Omega$), améliorant ainsi les performances des pièces conductrices. Après le polissage, un nettoyage par ultrasons est combiné pour éliminer les résidus, améliorer encore l'intégrité de la couche de passivation NiO (épaisseur $> 10 \text{ nm}$) et stabiliser la perte de poids en dessous de $0,06 \text{ mg/cm}^2$. À l'avenir, des revêtements résistants à la corrosion (tels que TiN, épaisseur $1,5\text{-}2 \mu\text{m}$) ou un traitement de nitruration au plasma pourront être développés pour améliorer encore la résistance à la corrosion dans des environnements extrêmes (tels que $\text{pH} < 2$).

(5) Spécifications d'essai pour les composites en carbure cémenté WCTiCNi

La vérification des performances est effectuée conformément aux normes internationales afin de garantir la fiabilité et la répétabilité des données. Le test de résistance à l'usure est basé sur la norme ASTM G65 (test d'usure sur sable sec/roue en caoutchouc) pour évaluer le taux d'usure. Le test de résistance à la corrosion est basé sur la norme ASTM G59 (test de polarisation électrochimique) pour mesurer la perte de poids et l'indice de corrosivité (i_{corr}). La méthode à quatre sondes est utilisée pour mesurer la résistivité (précision $\pm 0,01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). La taille de l'échantillon d'essai est de $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Les conditions environnementales sont contrôlées à $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ et l'humidité est $< 65 \%$. La valeur moyenne est prise après cinq répétitions de la mesure. La microstructure et la distribution des phases sont analysées par MEB et EDS (écart $< 0,1 \%$). Par exemple, après frittage de WC10TiC10Ni à $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la dureté atteint HV 1650 ± 30 et la perte de poids est de $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ et la résistivité de $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, ce qui est meilleur que les valeurs cibles, prouvant l'efficacité de la stratégie d'optimisation.

(6) Effet d'optimisation global et perspectives d'application

Grâce à l'effet synergique des stratégies ci-dessus, l'échantillon WC10TiC10Ni fritté à $1450 \text{ }^\circ\text{C}$, avec une granulométrie de $0,51 \mu\text{m}$ et un $R_a < 0,05 \mu\text{m}$, présente une dureté HV 1650 , une perte de poids de $0,06 \text{ mg/cm}^2$ et une résistivité de $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, ce qui est supérieur à l'objectif initial. La résistance à l'usure répond aux exigences des moules électroniques (durée de vie $> 10^6$ fois), la résistance à la corrosion est compatible avec les équipements marins (service > 5 ans) et la conductivité est adaptée aux pièces conductrices (résistance de contact $< 0,1 \text{ m}\Omega$). Comparé au

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC10Co (dureté HV 1500, perte de poids 0,09 mg/cm²), le système WCTiCNi présente des avantages évidents en termes de polyvalence. À l'avenir, la dureté pourra être encore augmentée au-dessus de HV 1700 et la perte de poids pourra être réduite à 0,05 mg/cm² en introduisant la technologie nano-TiC (< 100 nm) ou de frittage plasma (SPS), élargissant ainsi son potentiel d'application dans les domaines de l'aviation et de l'électronique haut de gamme.

L'optimisation des performances du carbure cimenté WCTiCNi équilibre dureté et résistance à la corrosion grâce à la teneur en TiC (5 %-10 %) et en Ni (8 %-10 %). Le frittage sous vide à 1 450 °C garantit une densité (> 99,5 %) et une uniformité. Le contrôle des grains de 0,51 µm améliore la résistance à l'usure. Le polissage de surface (Ra < 0,05 µm) réduit le taux d'usure. Les tests ASTM confirment la conformité des performances aux normes. Prenons l'exemple du WC10TiC10Ni : sa dureté HV 1 650, sa perte de poids de 0,06 mg/cm² et sa résistivité de 11 µΩ·cm répondent à des besoins multifonctionnels. À l'avenir, les nanotechnologies et la modification de surface pourront encore améliorer son applicabilité dans les environnements extrêmes.

9.2.1.6 Applications techniques des composites en carbure cimenté WCTiCNi

Les composites en carbure cimenté WCTiCNi ont démontré d'excellentes performances dans de nombreux domaines de l'ingénierie grâce à leur excellente résistance à l'usure, à la corrosion et à la conductivité électrique. Grâce à l'optimisation du rapport TiC/Ni et à un procédé de préparation sophistiqué, ce matériau a su répondre aux besoins de secteurs exigeants tels que les moules électroniques, les équipements marins et les contacts conducteurs. Ces applications confirment non seulement les propriétés multifonctionnelles des composites WCTiCNi, mais jettent également les bases de leur utilisation généralisée dans les environnements extrêmes et la fabrication de précision. Ce qui suit détaille sa valeur ajoutée en ingénierie et son rôle dans le développement de l'industrie, à travers des scénarios d'application, des avantages en termes de performances et des cas concrets.

(1) Moule électronique composite en carbure cimenté WCTiCNi

Dans le domaine des moules électroniques, le WC10TiC10Ni est un choix idéal grâce à son excellente résistance à l'usure et à sa dureté élevée. Ce matériau, à base de grains fins, présente une dureté très élevée. L'ajout de TiC réduit considérablement l'usure et assure la stabilité à long terme du moule lors de l'emboutissage haute fréquence. Sa durée de vie est multipliée par un million, dépassant largement les performances des matériaux traditionnels. De plus, la répartition uniforme et la protection anticorrosion de la phase Ni réduisent le risque de défaillance du moule due à la corrosion en milieu industriel humide, ce qui en fait un matériau largement utilisé dans la fabrication de composants électroniques de précision, tels que les boîtiers de téléphones portables et les moules de connecteurs, améliorant ainsi considérablement l'efficacité de la production et la qualité des produits.

(2) Pièces d'équipement marin composites en carbure cimenté WCTiCNi

Pour les applications d'équipements marins, le WC8TiC10Ni offre d'excellentes performances grâce à son excellente résistance à la corrosion et à l'usure. Grâce au polissage, la surface devient très lisse,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

réduisant la pénétration des agents corrosifs. La perte de poids est maintenue à un niveau faible, ce qui permet de répondre aux exigences de service en environnements salins, avec une durée de vie de plus de cinq ans. Le nickel, utilisé comme phase de liaison, offre une forte résistance à l'érosion marine, tandis que la teneur en TiC améliore la dureté du matériau, garantissant ainsi la durabilité à long terme des équipements de forage marin et des composants de navires. De plus, la teneur modérée en nickel maintient la conductivité du matériau, répondant ainsi aux exigences de connexion électrique, telles que les capteurs et les systèmes de contrôle des plateformes offshore, démontrant ainsi sa fiabilité dans les environnements difficiles.

(3) Contacts conducteurs composites en carbure cémenté WCTiCNi

Dans les applications de contacts conducteurs, le WC10TiC10Ni est privilégié pour ses excellentes propriétés électriques. Sa résistivité est maintenue à un niveau très faible et le réseau de Ni assure une circulation efficace du courant. La résistance de contact est également très faible, répondant aux exigences des commutateurs haute fréquence et des équipements microélectroniques. Sa durée de vie est supérieure à un million de fois supérieure, grâce à la dureté élevée du TiC qui réduit l'usure. La résistance à la corrosion du Ni offre une protection supplémentaire en environnements humides ou acides, ce qui lui confère une excellente performance dans les unités de contrôle électronique automobile et les relais industriels, réduisant considérablement l'usure par arc électrique et les défaillances de contact.

(4) Revêtement de pièces d'aviation composites en carbure cémenté WCTiCNi

Les composites WCTiCNi présentent également un fort potentiel pour les revêtements de composants aéronautiques. Par exemple, le WC10TiC8Ni est utilisé pour les revêtements anti-usure des aubes et des moteurs de turbine. Sa dureté élevée et sa résistance aux températures élevées (plus de 800 °C) prolongent considérablement la durée de vie des composants. Le TiC offre une protection de surface supplémentaire, réduisant l'usure due aux flux d'air à grande vitesse et au décapage des particules, tandis que la résistance à la corrosion du Ni assure la stabilité du revêtement dans les environnements à forte humidité et au brouillard salin, prolongeant ainsi les cycles de maintenance. Ce revêtement présente également une certaine conductivité, répondant aux exigences de mise à la terre des équipements avioniques, et offre d'excellentes performances dans les moteurs d'avion et les composants d'hélices, améliorant ainsi la sécurité globale des vols.

(5) Outils de forage pétrolier composites en carbure cémenté WCTiCNi

Dans l'industrie du forage pétrolier, le WC12TiC10Ni est largement utilisé dans les forets et les outils de coupe en raison de son excellente résistance à l'usure et à la corrosion. Le TiC améliore la résistance à l'usure du matériau, lui permettant de travailler longtemps dans des formations rocheuses très dures, tandis que l'ajout de Ni améliore considérablement la résistance à la corrosion de l'outil dans les environnements contenant du soufre et du chlore, limitant ainsi la perte de poids et garantissant l'efficacité du forage et la durée de vie de l'outil. Le polissage de surface réduit encore davantage les risques d'usure et de corrosion, ce qui lui confère une excellente performance dans les opérations de forage en eaux profondes et à terre, réduisant la fréquence de remplacement et les coûts d'exploitation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(6) Dispositifs médicaux composites en carbure cimenté WCTiCNi

Le WC8TiC5Ni est également en plein essor dans le domaine des dispositifs médicaux, notamment pour la fabrication de scalpels orthopédiques et de forets dentaires. La dureté élevée du TiC garantit un tranchant précis et répond aux exigences de la chirurgie de précision. La biocompatibilité et la résistance à la corrosion du Ni réduisent le risque de corrosion dans l'environnement fluide du corps humain. La perte de poids est très faible, ce qui prolonge la durée de vie de l'instrument. De plus, sa faible résistivité répond aux exigences de conductivité de certains instruments électrochirurgicaux, offre de bonnes performances en environnements stériles et humides et améliore la sécurité et l'efficacité de la chirurgie.

(7) Avantages complets et applications étendues des matériaux composites en carbure cimenté WCTiCNi

Ces applications démontrent pleinement l'optimisation synergétique des matériaux composites WCTiCNi en termes de résistance à l'usure, de résistance à la corrosion et de conductivité électrique. Dans les moules électroniques, sa dureté élevée et son faible taux d'usure prolongent la durée de vie du moule ; dans les équipements marins, la résistance à la corrosion du Ni assure une utilisation à long terme ; dans les contacts conducteurs, sa faible résistivité et sa longue durée de vie répondent à des exigences de fiabilité élevées ; dans les revêtements de composants aéronautiques, sa résistance aux températures élevées et à l'usure améliore la durée de vie des composants ; dans les outils de forage pétrolier, la résistance à l'usure et à la corrosion améliore l'efficacité ; dans les dispositifs médicaux, la biocompatibilité et sa dureté élevée garantissent la sécurité. Comparé aux matériaux WC-Co traditionnels, le système WCTiCNi présente des avantages évidents en termes de polyvalence. Par exemple, la perte de poids du WC10Co est supérieure à celle du WC10TiC10Ni, et la résistance à la corrosion est nettement améliorée.

Le WCTiCNi présente également un potentiel d'applications élargi. Par exemple, dans la couche anti-usure des voies ferrées, sa dureté élevée permet de réduire l'usure ; dans les appareils électroniques portables, sa faible résistivité permet de fabriquer des composants conducteurs flexibles. À l'avenir, grâce à l'adaptation de la composition des matériaux et des technologies de traitement de surface, son champ d'application dans les domaines de l'énergie, de la médecine et des transports pourrait être encore élargi.

Les composites en carbure cimenté WCTiCNi sont particulièrement performants dans les moules électroniques, les équipements marins, les contacts conducteurs, les revêtements de composants aéronautiques, les outils de forage pétrolier et les dispositifs médicaux. La dureté élevée, le faible taux d'usure et la longue durée de vie du WC10TiC10Ni répondent aux exigences des moules ; la faible perte de poids et la longue durée de vie du WC8TiC10Ni sont compatibles avec les applications marines ; la faible résistivité et les performances de contact du WC10TiC10Ni garantissent la fiabilité des contacts ; la résistance aux hautes températures du WC10TiC8Ni améliore la durée de vie des composants aéronautiques ; la résistance à l'usure et à la corrosion du WC12TiC10Ni optimise l'efficacité du perçage ; et la biocompatibilité du WC8TiC5Ni est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

compatible avec les dispositifs médicaux. Ces applications confirment les nombreux avantages du WCTiCNi en termes de résistance à l'usure, de résistance à la corrosion et de conductivité. À l'avenir, grâce à l'amélioration des procédés et à l'innovation des matériaux, son potentiel d'application dans divers domaines d'ingénierie pourra être encore accru.

9.2.2 Essai de performance des composites en carbure cimenté WCTiCNi

9.2.2.1 Principe de l'essai de performance des matériaux composites en carbure cimenté WCTiCNi

Les essais de performance constituent le principal moyen d'évaluer les performances globales des composites en carbure cimenté WCTiCNi. Ils quantifient la dureté (valeur cible $> HV\ 1600 \pm 30$), le taux d'usure (valeur cible $< 0,06\ mm^3 / N \cdot m \pm 0,01\ mm^3 / N \cdot m$), la perte de poids (valeur cible $< 0,08\ mg/cm^2 \pm 0,01\ mg/cm^2$) et la résistivité (valeur cible $< 12\ \mu\Omega \cdot cm \pm 0,1\ \mu\Omega \cdot cm$), et examinent systématiquement sa résistance à l'usure, sa résistance à la corrosion et sa conductivité. Ces indicateurs reflètent directement la fiabilité et la durabilité du matériau dans les applications pratiques. Les normes d'essai incluent l'ASTM G65 (essai d'usure sur sable sec) pour évaluer la résistance à l'usure, l'ASTM G59 (essai de corrosion électrochimique) pour évaluer la résistance à la corrosion et la méthode à quatre sondes pour mesurer la conductivité, visant à garantir l'excellente performance des matériaux WCTiCNi dans le domaine de l'électronique (résistance de contact $< 0,1\ m\Omega \pm 0,01\ m\Omega$) et de l'environnement marin (durée de vie $> 5\ ans \pm 0,5\ an$). Le processus d'essai fournit non seulement des données quantitatives, mais aussi une base scientifique pour l'optimisation des matériaux et l'amélioration des processus.

9.2.2.2 Méthodes et équipements d'essai des performances des matériaux composites en carbure cimenté WCTiCNi

Les tests de performance s'appuient sur des équipements de pointe et des procédures normalisées. Le duromètre Vickers effectue une mesure d'indentation à la surface du matériau avec une charge de $10\ kg \pm 0,1\ kg$ afin d'évaluer avec précision la dureté, reflétant la contribution de la dureté élevée ($> HV\ 2000$) de la phase TiC à la résistance à l'usure. Le duromètre simule les conditions de travail réelles avec une charge de $130\ N \pm 1\ N$ et quantifie le taux d'usure grâce à l'essai d'usure au sable sec (ASTM G65). L'abrasion et le frottement des particules de sable dans les conditions d'essai simulent des environnements à forte usure, tels que les scénarios d'utilisation des moules électroniques et des outils de forage pétrolier. Le poste de travail électrochimique effectue des essais de corrosion (ASTM G59) avec une précision potentielle de $\pm 0,001\ V$ et évalue la résistance à la corrosion de la phase Ni et la stabilité de sa couche de passivation NiO en mesurant la perte de masse et la densité de courant de corrosion dans une solution de NaCl à 3,5 %. La règle des quatre sondes détermine avec précision la résistivité en appliquant un courant constant et en mesurant la chute de tension, reflétant la contribution conductrice du réseau Ni. La taille de l'échantillon est généralement de $10 \times 10 \times 5\ mm \pm 0,1\ mm$, et l'environnement d'essai est contrôlé à $23\ ^\circ C \pm 2\ ^\circ C$ et à une humidité $< 65\ \%$ afin de réduire l'interférence des facteurs environnementaux. L'essai est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

répété 5 fois et la valeur moyenne est prise en compte pour garantir la fiabilité et la significativité statistique des données.

(1) Analyse des données et vérification des performances

Français Les données de test révèlent les avantages de performance des matériaux WCTiCNi grâce à une analyse complète. Prenant WC10TiC10Ni comme exemple, sa dureté atteint $HV\ 1650 \pm 30$, indiquant que la teneur en TiC ($10\% \pm 0,1\%$) et la structure à grains fins ($0,51\ \mu m$) améliorent efficacement la résistance à l'usure, avec un taux d'usure de $0,05\ mm^3 / N \cdot m \pm 0,01\ mm^3 / N \cdot m$. Meilleur que la valeur cible, montrant une supériorité dans le poinçonnage et la découpe à haute fréquence. La perte de poids de $0,06\ mg/cm^2 \pm 0,01\ mg/cm^2$ est inférieure à $0,08\ mg/cm^2$, prouvant que la teneur en Ni ($10\% \pm 1\%$) offre une bonne protection contre la corrosion grâce à la couche de passivation NiO (épaisseur $\sim 10\ nm$), répondant aux exigences de service à long terme des équipements marins et des dispositifs médicaux. Français La résistivité est de $11\ \mu\Omega \cdot cm \pm 0,1\ \mu\Omega \cdot cm$ et inférieure à $12\ \mu\Omega \cdot cm$, ce qui indique que la continuité du réseau Ni ($> 95\%$) assure une conductivité efficace et prend en charge l'application de contacts conducteurs et d'avionique. Les analyses SEM et EDS confirment en outre la distribution uniforme des particules de TiC (écart $< 0,1\%$) et la stabilité de la phase Ni, et la détection XPS vérifie la formation de la couche NiO (position du pic Ni 2p $\sim 854\ eV$), fournissant un support microscopique aux données de performance.

(2) Vérification orientée application et étendue

Les résultats des tests guident directement l'application des matériaux WCTiCNi dans des scénarios d'ingénierie spécifiques. Dans les moules électroniques, la dureté et le faible taux d'usure garantissent une durée de vie supérieure à un million de fois ; dans les équipements marins, la faible perte de poids assure une durée de vie supérieure à cinq ans ; dans les contacts conducteurs, la faible résistivité répond à des exigences de fiabilité élevées. De plus, les tests de performance ont également été étendus à d'autres domaines, tels que les revêtements de composants aéronautiques. La dureté élevée et la résistance aux températures élevées ($> 800\ ^\circ C$) du WC10TiC8Ni ont confirmé son applicabilité aux aubes de turbine par des tests de résistance à l'usure et à la corrosion ; dans les outils de forage pétrolier, le faible taux d'usure et la résistance à la corrosion du WC12TiC10Ni ont confirmé ses avantages dans les environnements soufrés par des tests de simulation ; dans les dispositifs médicaux, la faible perte de poids et la biocompatibilité du WC8TiC5Ni justifient l'utilisation d'outils orthopédiques par des tests de corrosion. Les données de test fournissent également une base d'optimisation. Par exemple, une granulométrie trop importante ($> 2\ \mu m$) entraînera une augmentation de 15% du taux d'usure, et une température de frittage trop élevée ($> 1\ 500\ ^\circ C$) peut augmenter la ségrégation de 10% , ce qui devra être contrôlé par des ajustements de procédé. À l'avenir, des essais d'usure dynamique et des simulations de corrosion à long terme pourront être introduits pour vérifier davantage les performances des matériaux dans des conditions extrêmes.

9.2.2.3 Analyse du mécanisme d'essai de performance des matériaux composites en carbure cémenté WCTiCNi

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'analyse des mécanismes d'essai de performance des matériaux composites en carbure cimenté WCTiCNi vise à révéler en profondeur les mécanismes microscopiques à l'origine de leur dureté, de leur taux d'usure, de leur résistance à la corrosion et de leur résistivité. Ces caractéristiques déterminent conjointement les performances des matériaux dans des applications techniques telles que l'électronique, l'océanographie et la conductivité. En combinant données expérimentales et observations microscopiques, l'effet de renforcement du TiC, la contribution du Ni à la ténacité et à la résistance à la corrosion, ainsi que l'influence de la granulométrie et de la distribution des phases sont analysés afin d'apporter un soutien théorique à l'optimisation des performances des matériaux et au développement de leurs applications. Cette section détaille les aspects des essais de dureté, des mécanismes d'usure, du comportement à la corrosion et des caractéristiques de résistivité, et vérifie leur mécanisme en les combinant à des résultats d'essais réels.

(1) Mécanisme d'essai de dureté

L'essai de dureté reflète principalement l'effet de renforcement du TiC sur les matériaux composites WCTiCNi. La dureté inhérente du TiC dépasse $HV\ 2000 \pm 50$, ce qui est dû à sa structure de liaison covalente étroite. Cette dureté élevée améliore significativement les performances globales du matériau grâce au renforcement du réseau. Prenons l'exemple du WC10TiC10Ni : sa dureté atteint $HV\ 1650 \pm 30$, obtenue grâce à la contribution synergique du WC (environ $HV\ 1800 \pm 30$) et du TiC. Le WC fournit une dureté de base comme phase dure principale, et l'ajout de TiC améliore encore la résistance à la compression de surface. Lors de l'essai, un duromètre Vickers (charge de $10\ kg \pm 0,1\ kg$) a été utilisé pour mesurer l'indentation de surface. Français La structure à grains fins ($0,5\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$) améliore encore la résistance à la déformation en augmentant la densité des joints de grains ($> 10^{14}\ m^{-2}$), ce qui rend la dureté uniformément répartie et réduit le ramollissement local. Les observations SEM ont montré que les particules de TiC étaient uniformément intégrées dans la matrice WC (écart $< 0,1\ \%$), ce qui a amélioré la force de liaison interphase ($> 120\ MPa$), soutenant ainsi les performances de dureté élevées.

(2) Analyse du mécanisme d'usure

Le test de taux d'usure quantifie la résistance à l'usure du matériau en simulant les conditions de travail réelles. Le taux d'usure du WC10TiC10Ni est inférieur à $0,06\ mm^3 / N \cdot m \pm 0,01\ mm^3 / N \cdot m$, qui est affecté par la dureté élevée du TiC et la ténacité du Ni. Le processus d'usure implique une perte de masse (Δm , précision $\pm 0,01\ mg$), une densité du matériau (ρ environ $14,5\ g/cm^3 \pm 0,1\ g/cm^3$), une charge appliquée ($F\ 130\ N \pm 1\ N$) et une distance de glissement ($L\ 1436\ m \pm 1\ m$), les grains fins ($0,5\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$) réduisent le taux d'usure d'environ $10\ \% \pm 2\ \%$ en réduisant l'intrusion abrasive et la propagation des fissures. Français La ténacité du Ni (K_{Ic} environ $12\ MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5$) a encore réduit la formation de fissures d'usure (taille $< 0,1\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$), et la morphologie d'usure observée par SEM a montré que la profondeur de la rainure était inférieure à $1\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$, indiquant que la surface avait une forte résistance à l'usure. En revanche, une teneur trop élevée en TiC ($> 15\ \%$) peut entraîner une diminution de la ténacité et un risque accru de microfissures, et un équilibre doit être maintenu en optimisant le rapport.

(3) Mécanisme de comportement de la corrosion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Français Le test de corrosion évalue la résistance à la corrosion du WCTiCNi par méthode électrochimique. Avec Ni comme phase de liaison, sa densité de courant de corrosion (i_{corr}) est d'environ $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, ce qui est nettement meilleur que celui des matériaux traditionnels à base de Co (i_{corr} est d'environ $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$), grâce à la couche de passivation NiO (épaisseur $\sim 10 \text{ nm}$) formée sur la surface Ni. Dans une solution de NaCl à 3,5 %, la perte de poids est contrôlée à $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, inférieure à la valeur cible de $0,08 \text{ mg/cm}^2$. Français L'analyse EDS a vérifié la composition chimique de la couche de NiO (rapport Ni:O d'environ 1:1 $\pm 0,1$), indiquant que la stabilité électrochimique du Ni (potentiel de corrosion $E_{corr} \sim 0,1 \text{ V}$ par rapport à SCE) a effectivement ralenti la vitesse de corrosion. En revanche, la phase Co est plus susceptible de former des oxydes dans les mêmes conditions, et la perte de poids peut atteindre $0,09 \text{ mg/cm}^2$. L'ajout de Ni améliore significativement la durabilité du matériau dans les environnements marins ou les milieux acides. Les observations SEM montrent que la profondeur de la piqure de corrosion est $< 0,5 \mu\text{m}$, confirmant ainsi sa supériorité.

(4) Analyse des caractéristiques de résistivité

Le test de résistivité mesure la conductivité électrique du WCTiCNi par la méthode des quatre sondes. La résistivité du WC10TiC10Ni est stable à $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, ce qui est inférieur à la valeur cible de $12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Ceci est principalement dû à la continuité du réseau Ni ($> 95 \% \pm 2 \%$). Le Ni fournit un chemin de migration électronique efficace en tant que phase de liaison. Le TiC, en tant que phase dure non métallique, présente une résistivité intrinsèque élevée (environ $50 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), ce qui augmente légèrement la résistance globale du matériau composite (contribution $< 5 \% \pm 1 \%$), mais en raison de la distribution uniforme de la phase Ni (écart $< 0,1 \%$), la conductivité globale reste excellente, ce qui favorise l'application de contacts conducteurs et d'avionique. L'analyse SEM montre que la phase Ni forme un réseau tridimensionnel, et l'EDS confirme que la teneur en Ni ($10 \% \pm 1 \%$) est corrélée négativement avec la résistivité, indiquant qu'une augmentation modérée de la teneur en Ni peut réduire davantage la résistivité, mais la dureté et la résistance à la corrosion doivent être équilibrées.

(5) Observation microscopique et mécanisme global

L'analyse microscopique fournit une preuve intuitive du mécanisme de performance par MEB et EDS. La morphologie de l'usure présente des rainures et des marques d'usure nettes. La granulométrie de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ limite efficacement l'extension de l'usure. La présence de la couche de NiO réduit la pénétration du milieu corrosif. L'EDS détecte la corrélation entre la teneur en TiC ($10 \% \pm 0,1 \%$), la dureté et le taux d'usure. L'analyse XPS vérifie en outre l'état chimique de la couche de NiO (pic Ni 2p $\sim 854 \text{ eV}$), étayant le mécanisme de résistance à la corrosion. L'effet combiné du renforcement des joints de grains et de la liaison interphase ($> 120 \text{ MPa}$) réduit la porosité ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) et le taux de défauts ($< 0,05 \%$), et améliore la stabilité globale des performances du matériau. Comparé au WC10Co, le WCTiCNi présente des avantages évidents en termes de ténacité et de résistance à la corrosion, et les données de taux d'usure et de perte de poids sont meilleures que celles des matériaux traditionnels.

(6) Direction de la vérification et de l'optimisation de l'application

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'analyse des mécanismes d'essai guide les performances du WCTiCNi dans les applications d'ingénierie. Dans les moules électroniques, sa dureté élevée et son faible taux d'usure garantissent une durée de vie supérieure à un million de fois supérieure ; dans les équipements marins, sa faible perte de poids assure une durée de vie supérieure à cinq ans ; dans les contacts conducteurs, sa faible résistivité répond à des exigences de fiabilité élevées. Les optimisations futures pourraient se concentrer sur la réduction de la granulométrie à $0,3\text{ }\mu\text{m}$ afin de réduire encore le taux d'usure, et sur l'augmentation de la teneur en Ni à 12 % pour améliorer la résistance à la corrosion, tout en prêtant attention au risque de réduction de la dureté. L'introduction de revêtements de surface (tels que TiN) peut améliorer la résistance à la corrosion et prolonger la durée de vie dans des environnements à $\text{pH} < 2$; le frittage plasma (SPS) peut améliorer la densité et l'uniformité afin de répondre aux exigences plus strictes des secteurs aéronautique et médical.

Français Le mécanisme de test de performance du matériau composite en carbure cimenté WCTiCNi révèle l'effet synergique du TiC renforçant la dureté ($\text{HV } 1650 \pm 30$), du Ni améliorant la ténacité et la résistance à la corrosion (perte de poids $0,06\text{ mg/cm}^2$), du réseau Ni soutenant la conductivité (résistivité $11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$), et le taux d'usure est inférieur à $0,06\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ grâce aux grains fins et à la liaison interphase. Le SEM et l'EDS fournissent des preuves microscopiques, et ses performances d'application dans de multiples domaines peuvent être encore améliorées grâce à l'optimisation des grains et au traitement de surface à l'avenir.

9.2.2.4 Méthodes d'essai de performance des matériaux composites en carbure cimenté WCTiCNi

Pour garantir la précision et la cohérence des essais de performance des matériaux composites en carbure cimenté WCTiCNi, des méthodes d'essai normalisées et des équipements de précision sont nécessaires, couvrant des indicateurs clés tels que la dureté, le taux d'usure, la résistance à la corrosion et la résistivité. Ces méthodes d'essai doivent non seulement refléter la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la conductivité du matériau, mais aussi garantir l'applicabilité des données à des scénarios d'application tels que les moules électroniques, les équipements marins et les contacts conducteurs. L'optimisation des conditions d'essai et du processus de préparation des échantillons permet de fournir des résultats fiables pour l'évaluation des performances des matériaux, l'amélioration des procédés et les applications techniques. Vous trouverez ci-dessous une explication détaillée des méthodes d'essai, des paramètres de l'équipement et de la préparation des échantillons afin de garantir la précision et la répétabilité des essais et de répondre aux exigences de performances multifonctionnelles.

(1) Essai de dureté

L'essai de dureté est réalisé avec un duromètre Vickers. En appliquant une charge de $10\text{ kg} \pm 0,1\text{ kg}$ pour former une empreinte à la surface du matériau, la longueur diagonale est mesurée afin de calculer la valeur de dureté avec une précision de ± 30 , reflétant la contribution de la phase TiC (dureté $> \text{HV } 2000$) au renforcement global. Avant l'essai, il est nécessaire de s'assurer que la surface est plane et exempte de défauts apparents, et que les empreintes sont espacées d'au moins 2,5 fois

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la longueur diagonale de l'empreinte afin d'éviter toute influence mutuelle. Chaque essai est répété 5 fois, la valeur moyenne étant prise en compte pour réduire l'erreur. La dureté de l'échantillon WC10TiC10Ni atteint généralement HV 1650 ± 30. Cette méthode d'essai de haute précision est adaptée à l'évaluation de la durabilité des matériaux lors de l'emboutissage et de la découpe haute fréquence, répondant ainsi aux exigences des moules électroniques et des outils de forage pétrolier.

(2) Test d'usure

Des essais d'usure ont été réalisés conformément à la norme ASTM G65 à l'aide d'un banc d'essai d'usure à roue en caoutchouc/sable sec, avec une charge appliquée de 130 N ± 1 N et une distance de glissement de 1 436 m ± 1 m, afin de simuler l'usure en conditions réelles de travail. Pendant l'essai, des particules de sable ont été projetées sur la surface de l'échantillon à un débit constant, et la perte de masse a été mesurée à l'aide d'une balance de précision (précision ± 0,01 mg). Le taux d'usure a été calculé en fonction de la masse volumique du matériau (environ 14,5 g/cm³), avec une valeur cible inférieure à 0,06 mm³/N·m ± 0,01 mm³/N·m. L'environnement d'essai est contrôlé à 23 °C ± 2 °C, avec une humidité < 65 %, et chaque essai est répété 3 fois, la valeur moyenne étant prise en compte pour garantir une répétabilité > 95 % ± 2 %. Par exemple, le taux d'usure du WC10TiC10Ni atteint 0,05 mm³ / N · m ± 0,01 mm³ / N · m , ce qui indique que sa structure à grains fins (0,5 μm) et sa distribution uniforme de TiC (écart < 0,1 %) améliorent efficacement la résistance à l'usure et conviennent aux revêtements de composants aéronautiques et aux couches résistantes à l'usure ferroviaires.

(3) Essai de corrosion

Français L'essai de corrosion a été réalisé à l'aide d'un poste de travail électrochimique utilisant la norme ASTM G59, avec une vitesse de balayage de 0,1 mV/s ± 0,01 mV/s, et la densité de courant de corrosion (i_{corr}) et la perte de poids ont été mesurées dans une solution de NaCl à 3,5 %. Après que l'échantillon a été immergé pendant 24 heures, la courbe de polarisation a été enregistrée à l'aide d'un système à trois électrodes (électrode de travail, électrode de référence et électrode auxiliaire), et la perte de poids a été déterminée par pesée (précision ± 0,01 mg/cm²), avec une valeur cible inférieure à 0,08 mg/cm² . ± 0,01 mg/ cm² . La température d'essai a été contrôlée à 25 °C ± 1 °C, le pH a été stabilisé à 6,5-7,0, et la valeur moyenne a été prise après 3 répétitions. La perte de poids du WC10TiC10Ni est de 0,06 mg/cm² ± 0,01 mg/cm², i_{corr} est d'environ 10⁻⁶ A/cm², ce qui est meilleur que les matériaux à base de Co, prouvant l'avantage de résistance à la corrosion de la couche de passivation NiO de Ni (épaisseur ~ 10 nm) dans les équipements marins et les dispositifs médicaux.

(4) Test de résistivité

Le test de résistivité utilise la méthode des quatre sondes : une source de courant constant applique 1 mA ± 0,01 mA et la chute de tension est mesurée pour calculer la résistivité. La précision est de ± 0,01 μΩ·cm et la valeur cible est inférieure à 12 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm. L'espacement des sondes est de 1 mm et la surface de l'échantillon doit être exempte de toute couche d'oxyde ou de saleté. Le test est répété 5 fois et la valeur moyenne est prise en compte pour garantir la contribution conductrice du réseau Ni (continuité > 95 %). La résistivité du WC10TiC10Ni est stable à 11 μΩ·cm

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, reflétant la densité électronique élevée et la distribution uniforme de la phase Ni (écart $< 0,1 \%$), prenant en charge les exigences de faible résistance de contact ($< 0,1 \text{ m}\Omega$) des contacts conducteurs et de l'électronique portable.

(5) Préparation des échantillons

La préparation des échantillons est une étape clé pour garantir la précision des tests. Le polissage au diamant ou le polissage mécano-chimique (CMP) permet de contrôler la rugosité de surface (R_a) à $< 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, de réduire les défauts de surface et les microfissures, et d'aplanir la surface afin de réduire l'usure et la pénétration de milieux corrosifs. Après le polissage, un nettoyage par ultrasons est utilisé pour éliminer les résidus. La taille de l'échantillon est de $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, et le chanfrein des bords est de $0,2 \text{ mm}$ pour éviter la concentration de contraintes. L'uniformité de surface de l'échantillon préparé est vérifiée par MEB (écart $< 0,1 \%$), fournissant une base cohérente pour les tests ultérieurs. Par exemple, le taux d'usure de l'échantillon WC10TiC10Ni sous la préparation ci-dessus est de $0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ et une répétabilité de $> 95 \% \pm 2 \%$, indiquant que le processus de polissage améliore considérablement la fiabilité et la cohérence des résultats des tests.

(6) Contrôle environnemental et vérification des données

Pendant le test, les conditions environnementales doivent être strictement contrôlées, la température étant maintenue à $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et l'humidité $< 65 \%$ afin de réduire les interférences de température et d'humidité. L'équipement a été étalonné avant chaque test afin de garantir la stabilité des paramètres de charge, de courant et de potentiel. La vérification des données a été réalisée par comparaison avec des échantillons standard (tels que WC10Co), combinant MEB et EDS pour analyser la microstructure, confirmant la teneur en TiC ($10 \% \pm 0,1 \%$) et la distribution du Ni (écart $< 0,1 \%$), tandis que la XPS permet de vérifier plus en détail la formation de la couche de NiO. Les résultats des tests peuvent également être étendus à d'autres scénarios d'application, tels que les revêtements aéronautiques (résistance aux hautes températures) et les dispositifs médicaux (biocompatibilité), fournissant des données utiles à l'optimisation des matériaux.

(7) Orientation de l'application et améliorations futures

Ces méthodes d'essai guident directement l'application des matériaux WCTiCNi en ingénierie. Les essais de dureté contribuent à l'évaluation de la durabilité des moules électroniques et des outils de forage pétrolier. Les essais d'usure optimisent les performances des pièces aéronautiques et des couches résistantes à l'usure ferroviaires. Les essais de corrosion garantissent la fiabilité à long terme des équipements marins et des dispositifs médicaux. Les essais de résistivité répondent aux besoins des contacts conducteurs et de l'électronique portable. À l'avenir, la simulation d'usure dynamique (comme les essais de rotation à grande vitesse) et l'immersion en corrosion longue durée ($> 1\,000$ heures) pourront être introduites, combinées à des équipements automatisés (comme un système de polissage robotisé) pour améliorer l'efficacité. Un traitement de surface à l'échelle nanométrique (comme le revêtement TiN) pourra être utilisé pour réduire davantage la rugosité à $R_a < 0,03 \mu\text{m}$, améliorant ainsi la précision des essais et les performances des matériaux.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les tests de performance des composites en carbure cimenté WCTiCNi ont été quantifiés par un duromètre Vickers (charge de 10 kg), les normes ASTM G65 (charge de 130 N), ASTM G59 (fréquence de balayage de 0,1 mV/s) et la méthode à quatre sondes (courant de 1 mA) afin de quantifier la dureté, le taux d'usure, la perte de poids et la résistivité. Les échantillons ont été polis à $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ pour garantir la précision. Prenons l'exemple du WC10TiC10Ni : un taux d'usure de $0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ et une répétabilité $> 95 \%$ ont confirmé la fiabilité de la méthode. À l'avenir, les essais dynamiques et l'optimisation des surfaces pourront encore accroître son potentiel d'application dans de nombreux domaines.

9.3 Autolubrification et anti-adhérence du carbure cimenté

9.3.1 Théorie de l'autolubrification et de l'anti-adhérence du carbure cimenté

L'autolubrification (coefficient de frottement $< 0,2 \pm 0,01$) et l'anti-adhérence (force d'adhérence $< 1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$) sont des propriétés que le carbure cimenté doit améliorer dans les applications industrielles modernes. Ces propriétés sont considérablement améliorées par l'introduction de lubrifiants solides (tels que MoS_2 et C, à raison de $5 \% \pm 0,1 \%$) et l'optimisation de la texture de surface (profondeur $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), répondant ainsi aux exigences des applications exigeantes telles que l'usinage à grande vitesse (vitesse $> 500 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$), l'usinage à sec (chaleur de frottement $< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) et le formage de moules (force de démoulage $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$). Les matériaux WCCo traditionnels présentent un coefficient de frottement naturel élevé (environ $0,5 \pm 0,05$), ce qui les rend difficiles à gérer efficacement dans des conditions de faible frottement et de forte adhérence. Cela entraîne des problèmes d'usure et d'adhérence lors de l'usinage à sec et du moulage de précision, limitant ainsi leur champ d'application. En revanche, le système WCTiCNi combine les propriétés de faible cisaillement des lubrifiants solides et l'effet de réduction de la traînée de la texture, offrant une nouvelle solution d'autolubrification et d'antiadhérence.

(1) Introduction des lubrifiants solides

Les lubrifiants solides MoS_2 et C sont essentiels à l'autolubrification et à l'anti-adhérence. Composé feuilleté, le MoS_2 offre un faible frottement grâce à sa faible force de van der Waals intercouche (environ 0,1 eV). Son coefficient de frottement peut être réduit à $0,15 \pm 0,01$, ce qui est adapté aux environnements de coupe à grande vitesse et d'usinage à sec. Le C (sous forme de graphite ou de carbure) réduit encore davantage la contrainte de cisaillement entre les surfaces grâce à sa structure lamellaire et à son autolubrification, notamment à haute température ($> 500^\circ\text{C}$). Lorsque la teneur est contrôlée à $5 \% \pm 0,1 \%$, le lubrifiant solide est réparti uniformément dans la matrice WC et TiC (écart $< 0,1 \%$). L'analyse SEM montre que les particules de MoS_2 et de C sont intégrées à la limite de phase, réduisant ainsi le contact direct avec le métal et la force d'adhérence à $0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. Comparé au coefficient de frottement élevé du WCCo ($0,5 \pm 0,05$), cet ajout réduit considérablement les pertes d'énergie et l'accumulation de chaleur ($< 100^\circ\text{C}$), améliorant ainsi la durée de vie de l'outil et l'efficacité de l'usinage. Par exemple, le coefficient de frottement du WC5 MoS_2 en coupe à sec est de $0,15 \pm 0,01$ et l'adhérence de $0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, répondant ainsi aux exigences de protection de l'environnement pour l'usinage sans liquide de refroidissement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Texture de surface et mécanisme de lubrification

$\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ à la surface du matériau par gravure laser ou usinage, ce qui améliore les propriétés d'autolubrification et d'anti-adhérence. Ces structures texturées peuvent capturer et stocker des particules de MoS_2 ou de C, réduisant ainsi le contact direct entre les paires de frottement. La courbe de Stribeck montre que de la zone de lubrification limite (faible vitesse et faible charge) à la zone de lubrification mixte (vitesse et charge moyennes), le coefficient de frottement diminue à moins de 0,2 avec l'amélioration de la distribution du lubrifiant. Une fois la profondeur et l'espacement des textures optimisés (environ 100-120 μm), la force d'adhérence ($< 1 \text{ N}$) est efficacement réduite, en particulier lors du formage de moules, la force de démoulage est réduite à $10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, ce qui réduit l'adhérence de la pièce et les dommages de surface. L'observation au MEB montre que l'épaisseur de la couche lubrifiante dans la texture est d'environ 5 à 10 μm , ce qui réduit considérablement l'adhérence des copeaux à la surface de l'outil, notamment lors de l'usinage de matériaux collants (tels que les alliages d'aluminium). De plus, la texture favorise une dissipation rapide de la chaleur de frottement ($< 100 \text{ }^\circ\text{C}$), évitant ainsi le collage induit par les températures élevées et prolongeant la durée de vie de l'outil.

(3) Théorie de la tribologie et normes de test

La théorie tribologique fournit un support théorique au mécanisme d'autolubrification et d'anti-adhérence. La courbe de Stribeck décrit l'évolution de l'état de lubrification en fonction de la charge et de la vitesse. Le système WCTiCNi assure la transition d'une lubrification limite à une lubrification mixte grâce à des lubrifiants solides et à une conception texturée. Le coefficient de frottement est réduit de 0,5 pour WCCo à 0,15-0,2. La norme d'essai ASTM G99 (frottement et usure axe-disque) est utilisée pour quantifier le coefficient de frottement et l'adhérence. La plage de charge est de 10 à 200 N, la vitesse de 0,1 à 1 m/s, et l'essai est répété 3 fois. La valeur moyenne est prise en compte pour garantir la fiabilité des données. Les conditions environnementales sont contrôlées à $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ et l'humidité à $50 \% \pm 5 \%$, simulant des conditions d'usinage à sec et de coupe à grande vitesse. Combinés à l'analyse de la morphologie de surface (SEM) et à la distribution du lubrifiant (EDS), les résultats des tests vérifient le rôle du MoS_2 et du C dans la réduction du frottement et de l'adhérence, fournissant des données à l'appui de l'optimisation des matériaux.

(4) Théorie de la tribologie et normes de test

La théorie tribologique fournit un support théorique au mécanisme d'autolubrification et d'anti-adhérence. La courbe de Stribeck décrit l'évolution de l'état de lubrification en fonction de la charge et de la vitesse. Le système WCTiCNi assure la transition d'une lubrification limite à une lubrification mixte grâce à des lubrifiants solides et à une conception texturée. Le coefficient de frottement est réduit de 0,5 pour WCCo à 0,15-0,2. La norme d'essai ASTM G99 (frottement et usure axe-disque) est utilisée pour quantifier le coefficient de frottement et l'adhérence. La plage de charge est de 10 à 200 N, la vitesse de 0,1 à 1 m/s, et l'essai est répété 3 fois. La valeur moyenne est prise en compte pour garantir la fiabilité des données. Les conditions environnementales sont contrôlées à $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ et l'humidité à $50 \% \pm 5 \%$, simulant des conditions d'usinage à sec et de coupe à grande vitesse. Combinés à l'analyse de la morphologie de surface (SEM) et à la distribution du lubrifiant (EDS), les résultats des tests vérifient le rôle du MoS_2 et du C dans la réduction du

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

frottement et de l'adhérence, fournissant des données à l'appui de l'optimisation des matériaux.

Introduction de lubrifiants solides à base de carbure cimenté (MoS_2 , C)

9.3.2.1 Aperçu du principe et de la technologie des lubrifiants solides au carbure cimenté

Les propriétés autolubrifiantes du carbure cimenté sont considérablement améliorées par l'introduction de lubrifiants solides MoS_2 et C. MoS_2 (résistance au cisaillement intercouche $< 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$, teneur $5 \% \pm 0,1 \%$) et C (forme graphite, coefficient de frottement $< 0,1 \pm 0,01$) réduisent efficacement le coefficient de frottement par une faible force de cisaillement ($< 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$), et la valeur cible est fixée à $< 0,2 \pm 0,01$, répondant ainsi aux exigences de faible frottement de la coupe à grande vitesse, du traitement à sec et du formage de moules. Français La structure en couches de MoS_2 (espacement intercouche d'environ $6,2 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) offre une surface de glissement lisse, réduisant le contact direct et la résistance au frottement entre les surfaces, tandis que la liaison sp^2 de C (énergie de liaison CC est d'environ $600 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$) réduit l'adhérence de surface ($< 1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$) grâce à ses caractéristiques lamellaires et améliore les performances anti-adhérence. Le WC en tant que matrice maintient une dureté élevée ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) et fournit un support structurel au matériau. Le lubrifiant doit être réparti uniformément (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) pour assurer l'optimisation synergique de l'effet de lubrification et des propriétés mécaniques. Cette combinaison permet au carbure cimenté de s'adapter aux exigences plus élevées de l'industrie moderne en matière de faible frottement et d'anti-adhérence sur la base de son avantage traditionnel de dureté élevée.

Composé feuilleté classique, le MoS_2 doit ses propriétés autolubrifiantes à sa structure cristalline hexagonale unique. Les couches sont reliées par de faibles forces de van der Waals (environ $0,1 \text{ eV}$). Cette faible énergie de liaison facilite le glissement des couches sous contrainte mécanique, réduisant ainsi considérablement la résistance au frottement, notamment en lubrification sans huile ou dans des environnements à haute température (par exemple, $> 400 \text{ }^\circ\text{C}$). Lorsque la teneur est contrôlée à $5 \% \pm 0,1 \%$, les particules de MoS_2 peuvent être uniformément dispersées dans la matrice WC pour former un réseau lubrifiant continu, réduisant ainsi le contact direct entre les métaux, inhibant ainsi efficacement l'accumulation de chaleur de frottement ($< 100 \text{ }^\circ\text{C}$) et prolongeant la durée de vie de l'outil. La forme graphite du C repose sur sa structure lamellaire bidimensionnelle et sa faible énergie de surface (environ $0,1 \text{ J/m}^2$). La grande stabilité et le faible cisaillement des liaisons sp^2 leur confèrent une excellente capacité anti-adhérente lors de la coupe à grande vitesse (par exemple, $> 500 \text{ m/min}$) ou de l'usinage à sec. La force d'adhérence est réduite à $< 1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, ce qui est particulièrement adapté à l'usinage de matériaux collants tels que les alliages d'aluminium ou de cuivre. Ces deux liaisons fonctionnent en synergie : le MoS_2 assure la lubrification dynamique et le C renforce l'anti-adhérent statique, formant ainsi un mécanisme de lubrification complémentaire.

En tant que matériau de base du carbure cimenté, le WC présente une dureté élevée ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) grâce à sa structure réticulaire compacte et à son effet de renforcement des joints de grains, ce

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

qui garantit l'intégrité structurelle du matériau sous forte charge. Cependant, le WC présente un coefficient de frottement élevé (environ $0,5 \pm 0,05$) et un manque d'autolubrification naturelle. Ce défaut est donc compensé par l'introduction de MoS_2 et de C. La répartition uniforme des lubrifiants (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) est essentielle à l'optimisation des performances. L'analyse MEB montre que les particules de MoS_2 et de C sont intégrées à la limite de phase du WC, formant une couche lubrifiante d'environ 5 à 10 μm , ce qui réduit le frottement interphase et la tendance à l'adhérence. Cette répartition est obtenue par mélange de poudre et broyage à billes afin de garantir que le lubrifiant n'affecte pas la dureté et la résistance à l'usure du WC, tout en améliorant les performances globales. Par rapport aux matériaux WCCo traditionnels, le système WCTiCNi réduit le coefficient de frottement d'environ 70 % et l'adhérence de plus de 50 % grâce à l'ajout de lubrifiants, ce qui améliore considérablement l'efficacité du traitement à sec et la qualité du démoulage du moule.

De plus, les avantages de cette conception autolubrifiante et anti-adhérente se reflètent également dans son adaptabilité. Le MoS_2 est particulièrement performant sous vide ou sous atmosphère inerte, ce qui le rend adapté aux applications aéronautiques et spatiales. La stabilité à haute température du C₂ est particulièrement adaptée aux secteurs de l'énergie et des machines lourdes. La faible force de cisaillement du lubrifiant réduit non seulement les pertes d'énergie, mais aussi les contraintes thermiques pendant l'usinage ($< 100^\circ\text{C}$), prolongeant ainsi la durée de vie des outils et des moules, ce qui s'inscrit dans la tendance industrielle de la fabrication verte et du développement durable. Grâce à cette optimisation synergique multiphasée, le carbure cimenté a réalisé des avancées majeures en matière de faible frottement et de propriétés anti-adhérentes tout en conservant une dureté élevée. Il répond ainsi aux besoins de l'industrie moderne en matériaux performants, respectueux de l'environnement et multifonctionnels, et offre un support fiable pour la découpe à grande vitesse, l'usinage à sec et le formage de précision.

9.3.2.2 Analyse des mécanismes des lubrifiants solides au carbure cimenté (MoS_2 , C)

Carbure, les propriétés autolubrifiantes et anti-adhérentes du MoS_2 et du C découlent de leur microstructure et de leurs propriétés physico-chimiques uniques, qui améliorent significativement le comportement au frottement des matériaux lors de la coupe à grande vitesse, de l'usinage à sec et du formage de moules. Grâce à une analyse approfondie du mécanisme de lubrification, de l'influence des propriétés mécaniques et de la microdistribution, cette section explore comment le MoS_2 et le C réduisent de manière synergique le coefficient de frottement et l'adhérence tout en préservant l'intégrité structurelle de la matrice WC, fournissant ainsi une base scientifique pour l'optimisation de la teneur en lubrifiant et du procédé de préparation.

(1) Mécanisme de lubrification du lubrifiant solide au carbure cimenté (MoS_2 , C)

La propriété autolubrifiante du MoS_2 provient principalement de la faible force de van der Waals (environ $0,1 \text{ eV} \pm 0,01 \text{ eV}$) de sa structure cristalline feuilletée. Cette faible énergie de liaison facilite le glissement des couches sous l'action de la force de cisaillement. Lors du frottement, un film de transfert (d'environ $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ d'épaisseur) se forme, recouvrant la surface de la paire de frottement, et le coefficient de frottement est réduit à $0,15 \pm 0,01$. Ce film de transfert est obtenu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

par le dépôt et la réorientation des particules de MoS₂ sur la surface de contact, ce qui réduit considérablement le contact direct et la résistance au frottement entre les métaux, notamment dans les environnements secs ou à haute température (par exemple, > 400 °C). Le C assure un effet lubrifiant supplémentaire grâce au glissement lamellaire de sa structure hybride sp² (énergie de glissement d'environ 0,01 eV ± 0,001 eV). Sa faible énergie de surface (environ 0,1 J/m²) réduit efficacement l'adhérence à < 0,8 N ± 0,1 N, ce qui est particulièrement adapté au traitement de matériaux collants tels que les alliages d'aluminium ou de cuivre. L'effet synergique du MoS₂ et du C forme une combinaison de lubrification dynamique et statique, le MoS₂ assurant une interface de glissement continue et le C améliorant la capacité anti-adhérence, optimisant ainsi conjointement les performances de frottement.

(2) Influence des lubrifiants solides à base de carbure cémenté (MoS₂, C) sur les propriétés mécaniques

Français Dans l'échantillon WC5MoS₂, la dureté reste à HV 1550 ± 30 et la ténacité à la rupture (K_{1c}) est d'environ 10 MPa·m^{1/2} ± 0,5, ce qui indique que l'ajout de lubrifiant a un effet limité sur les propriétés mécaniques de la matrice WC. Les particules de MoS₂ et de C sont uniformément incorporées dans la matrice WC. L'analyse SEM montre que le lubrifiant n'interfère pas significativement avec la structure réticulaire du WC (écart < 0,1 % ± 0,02 %). La dureté est principalement fournie par le WC et le TiC, tandis que la ténacité bénéficie de la contribution plastique de la phase Ni. Cependant, lorsque la teneur en MoS₂ dépasse 5 % ± 0,1 %, K_{1c} diminue d'environ 10 % ± 2 %. Cela est dû au fait qu'un excès de lubrifiant entraîne un affaiblissement des joints de grains ou une agglomération des particules (> 0,1 %), augmentant le risque de formation de microfissures. Par conséquent, un contrôle précis de la teneur en lubrifiant est la clé pour maintenir un équilibre entre les propriétés mécaniques et l'effet de lubrification. 5 % est considéré comme la plage idéale et la dégradation des performances doit être évitée grâce à l'optimisation du rapport.

(4) Distribution microscopique et vérification des lubrifiants solides à base de carbure cémenté (MoS₂, C)

Français L'analyse microscopique a fourni une preuve visuelle du mécanisme de lubrification par SEM et EDS. L'observation SEM a montré que les particules de MoS₂ étaient uniformément incorporées dans la matrice WC (écart < 0,1 % ± 0,02 %), et la couverture du film de transfert après le test de frottement dépassait 90 % ± 2 %, indiquant que le lubrifiant a migré efficacement et recouvert la surface de contact pendant le processus de frottement, réduisant l'usure et l'adhérence. L'analyse EDS a confirmé la composition chimique du MoS₂ (rapport Mo :S d'environ 1:2 ± 0,1), vérifiant l'intégrité de sa structure en couches, tandis que la détection XPS a montré la structure sp² du C (position du pic C 1s ~ 284 eV ± 0,1 eV), confirmant la source de ses propriétés de faible frottement. La température de frittage a été contrôlée à 1400 °C ± 10 °C pour éviter la décomposition thermique du MoS₂ (température de décomposition > 1200 °C ± 10 °C) et garantir la stabilité du lubrifiant pendant le processus de préparation à haute température. Le MEB a également montré que la granulométrie (0,5 µm ± 0,01 µm) contribuait à la dispersion uniforme du lubrifiant et réduisait les défauts d'interphase (< 0,05 %).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) Comportement de frottement et influence de la charge des lubrifiants solides en carbure cémenté (MoS₂, C)

Le coefficient de frottement présente une certaine régularité avec la charge. Lorsque la charge est $> 50 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, le coefficient de frottement augmente légèrement ($< 5 \% \pm 1 \%$), ce qui est dû à la charge élevée comprimant l'épaisseur du film de transfert ($< 8 \text{ nm}$) et augmentant le contact métallique local. Cependant, le coefficient de frottement du WC5MoS₂ reste dans la plage de $0,15 \pm 0,01$, ce qui est meilleur que celui du WC10Co ($0,5 \pm 0,05$), indiquant que l'effet lubrifiant du MoS₂ et du C est toujours efficace sous des charges moyennes à élevées. L'analyse SEM montre que le film de transfert est localement endommagé ($< 5 \%$) sous une charge élevée, mais le glissement sp² du C complète l'effet lubrifiant et la force d'adhérence reste $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. Le contrôle de la chaleur de frottement ($< 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$) bénéficie des caractéristiques de faible cisaillement du lubrifiant, évitant le collage induit par les températures élevées et prolongeant la durée de vie de l'outil.

(6) Vérification de l'application et direction d'optimisation des lubrifiants solides à base de carbure cémenté (MoS₂, C)

Le WC5MoS₂ a été testé dans des applications techniques. En usinage à grande vitesse (500 m/min), le coefficient de frottement de $0,15 \pm 0,01$ et la force d'adhérence de $0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$ réduisent significativement l'usure et l'adhérence des copeaux lors de l'usinage à sec, et la durée de vie de l'outil est augmentée d'environ 30 %. En formage de moules, la faible adhérence favorise un démoulage en douceur des produits plastiques (force de démoulage $< 10 \text{ N}$). Une optimisation future pourrait être réalisée en augmentant la teneur en MoS₂ à 6 % ou en introduisant du nano-MoS₂ (granulométrie $< 100 \text{ nm}$) pour améliorer la stabilité du film de transfert et réduire le coefficient de frottement à 0,12. Combinée à la texturation de surface (profondeur $110 \text{ }\mu\text{m}$) ou à la technologie de projection plasma, la force d'adhérence peut être encore réduite à $< 0,5 \text{ N}$, ce qui convient aux scénarios à haute température ($> 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ou à forte charge ($> 200 \text{ N}$), tels que les moteurs d'avion et les machines lourdes.

Le MoS₂ réduit le coefficient de frottement à $0,15 \pm 0,01$ grâce à de faibles forces de van der Waals ($0,1 \text{ eV}$) et un film de transfert (10 nm), le C réduit l'adhérence à $< 0,8 \text{ N}$ grâce au glissement sp² ($0,01 \text{ eV}$), la dureté WC5MoS₂ HV 1550 et $K_{1c} 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ maintiennent les propriétés mécaniques, les microscopes électroniques à balayage (MEB) et les spectroscopies électrochimiques (EDS) vérifient la répartition uniforme du lubrifiant. Le frittage à $1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ évite la décomposition et l'effet de lubrification pourra être encore amélioré grâce à la nano-optimisation à l'avenir.

9.3.2.3 Analyse des facteurs affectant les lubrifiants solides au carbure cémenté (MoS₂, C)

Les lubrifiants solides en carbure cémenté MoS₂ et C sont fortement influencés par divers facteurs, qui déterminent conjointement leurs performances en termes de coefficient de frottement et d'adhérence lors de l'usinage à grande vitesse, de l'usinage à sec et du formage de moules, en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

modifiant la distribution du lubrifiant, la microstructure et les conditions environnementales. Des paramètres clés tels que la teneur, la granulométrie, la température de frittage et l'environnement d'utilisation de MoS₂ et C affectent directement les effets d'autolubrification et d'anti-adhérence, et ont un effet sur les propriétés mécaniques du matériau (telles que la dureté et la ténacité). L'analyse du mécanisme et de la relation entre ces facteurs permet d'optimiser la conception et le procédé de préparation du lubrifiant afin de répondre aux exigences de faible frottement et de durabilité élevée des applications techniques. Cette section détaille l'influence de chaque facteur sur les performances de lubrification en fonction de ses caractéristiques, des données expérimentales et des cas d'application, et propose des suggestions d'optimisation.

(1) Teneur en MoS₂

La teneur en MoS₂ est un facteur important affectant la lubrification et les propriétés mécaniques. Avec une teneur de 5 % ± 0,1 %, le coefficient de frottement peut être réduit à < 0,2 ± 0,01. La faible force de van der Waals (0,1 eV ± 0,01 eV) de la structure feuilletée de MoS₂ forme un film de transfert stable (épaisseur 10 nm ± 1 nm), ce qui réduit efficacement la résistance au frottement. À cette teneur, l'analyse MEB montre que le MoS₂ est uniformément intégré dans la matrice WC (écart < 0,1 % ± 0,02 %), avec une couverture > 90 % ± 2 %, ce qui répond aux besoins de l'usinage à grande vitesse (500 m/min) et de l'usinage à sec. Cependant, lorsque la teneur en MoS₂ dépasse 10 % ± 0,1 %, la ténacité à la rupture (K_{1c}) diminue d'environ 15 % ± 3 %, ce qui est dû à un excès de lubrifiant entraînant un affaiblissement des joints de grains ou une agglomération des particules (> 0,1 %), augmentant le risque de microfissures. Par exemple, le WC10MoS₂ a un K_{1c} de seulement 8 MPa·m^{1/2} en raison de sa teneur élevée en MoS₂. ± 0,5, tandis que le WC5MoS₂ atteint 10 MPa·m^{1/2} ± 0,5, indiquant que 5 % est le point d'équilibre entre les propriétés mécaniques et l'effet de lubrification. À l'avenir, le MoS₂ pourra être ajouté par étapes pour contrôler sa concentration locale et éviter une diminution de la ténacité.

(2) Teneur en C

La teneur en C a un effet significatif sur l'adhérence et la dureté. Lorsque la teneur est de 3 % ± 0,1 %, l'adhérence reste faible (< 0,8 N ± 0,1 N). Grâce à la structure de liaison sp² (énergie de glissement 0,01 eV ± 0,001 eV) et aux caractéristiques de glissement lamellaire du C, l'adhérence entre les surfaces est réduite, en particulier lors du traitement des alliages d'aluminium ou des plastiques. Les observations au MEB montrent que les particules de C forment un film lubrifiant uniforme d'une épaisseur d'environ 5 à 10 µm, ce qui améliore les performances anti-adhérence. Cependant, lorsque la teneur en C dépasse 5 % ± 0,1 %, la dureté diminue d'environ 10 % ± 2 %, car une teneur excessive en C affaiblit la résistance du réseau de la matrice WC. L'analyse EDS montre que la ségrégation de phase C (> 0,2 %) peut interférer avec la distribution uniforme du TiC et du WC. Par conséquent, une plage de 3 à 5 % est considérée comme idéale, et une teneur en C plus élevée nécessite une trace de durcisseur (tel que VC, < 1 %) pour maintenir la dureté (> HV 1500). L'optimisation peut être obtenue en améliorant la dispersion du nano C (taille des particules < 100 nm), réduisant ainsi la force d'adhérence à < 0,5 N.

(3) Taille des grains

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La granulométrie est essentielle à la performance de lubrification et à la stabilité du film de transfert. Lorsque la granulométrie est de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, le film de transfert se forme de manière stable avec un taux de couverture $> 90 \% \pm 2 \%$. Les particules de MoS_2 et de C sont uniformément réparties entre les joints de grains fins (densité $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$), ce qui réduit l'augmentation du coefficient de frottement et le maintient $< 0,2 \pm 0,01$. L'analyse SEM montre que les grains fins limitent l'intrusion abrasive et la propagation des fissures, et améliorent la capacité de charge du lubrifiant. Cependant, lorsque la granulométrie dépasse $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, le coefficient de frottement augmente d'environ $10 \% \pm 2 \%$. Français Cela est dû au fait que les gros grains réduisent le nombre de joints de grains, le taux de couverture du film de transfert diminue ($< 85 \%$), le contact métallique local augmente et la force d'adhérence peut augmenter jusqu'à plus de 1 N. Le contrôle de la granulométrie nécessite l'ajout d'inhibiteurs (tels que le VC, $0,5 \%-1 \%$) et l'optimisation du temps de broyage à billes ($40 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$). À l'avenir, les nanoparticules ($< 0,3 \mu\text{m}$) pourront être explorées pour stabiliser davantage le film de transfert et améliorer l'efficacité de la lubrification.

(4) Température de frittage

La température de frittage a un impact direct sur l'intégrité et la stabilité des performances du lubrifiant. À $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, le MoS_2 reste stable (température de décomposition $> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) sans décomposition significative. L'observation au MEB montre que le lubrifiant est uniformément réparti (écart $< 0,1 \%$), et que le coefficient de frottement et la force d'adhérence atteignent respectivement $0,15 \pm 0,01$ et $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. Cependant, lorsque la température de frittage dépasse $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la décomposition du MoS_2 augmente d'environ $5 \% \pm 1 \%$, et l'EDS détecte un déséquilibre du rapport Mo/S ($\text{Mo:S} < 1:2$), ce qui entraîne une diminution des performances de lubrification, et le coefficient de frottement peut atteindre $0,25 \pm 0,01$. Une température élevée peut également provoquer une graphitisation excessive de la phase C, affectant la dureté ($> \text{HV } 1500$). Par conséquent, 1400°C est considérée comme la température optimale et, combinée à une atmosphère protectrice d'argon ou à un frittage progressif (préchauffage à 1200°C), elle peut réduire davantage le risque de décomposition et améliorer la stabilité du lubrifiant.

(5) Environnement

Les conditions environnementales ont un impact significatif sur les performances de lubrification. Lorsque l'humidité dépasse $50 \% \pm 5 \%$, le coefficient de frottement augmente d'environ $10 \% \pm 2 \%$. Cela est dû à l'adsorption d'eau sur les surfaces de MoS_2 et de C, ce qui affaiblit la capacité de glissement intercouche, entrave la formation du film de transfert (couverture $< 85 \%$) et peut atteindre $1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. L'analyse au MEB montre que des traces d'oxydes ($< 0,1 \%$) apparaissent à la surface sous forte humidité, augmentant encore la résistance au frottement. Dans les environnements de traitement à sec ou marins, un contrôle de l'humidité entre 30% et 50% peut optimiser l'effet de lubrification. La couche de passivation NiO (épaisseur $\sim 10 \text{ nm}$) offre une protection supplémentaire dans les environnements à forte humidité, et la perte de poids reste inférieure à $0,06 \text{ mg/cm}^2$. À l'avenir, des revêtements de surface (tels que TiN, épaisseur $2 \mu\text{m}$) ou l'ajout d'agents hygroscopiques (tels que SiO_2 , $< 1\%$) pourront être utilisés pour réduire l'impact de l'humidité et maintenir de faibles performances de frottement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(6) Cas complet

Prenons comme exemples WC10MoS₂ et WC5MoS₂, WC10MoS₂ a une teneur en MoS₂ trop élevée (10%), donc K_{1c} tombe à 8 MPa·m^{1/2} ± 0,5, le coefficient de frottement augmente légèrement à 0,18 ± 0,01, indiquant un compromis entre la ténacité et l'effet de lubrification ; WC5MoS₂ fritté à 1400°C, K_{1c} atteint 10 MPa·m^{1/2} ± 0,5, coefficient de frottement 0,15 ± 0,01, adhérence 0,8 N ± 0,1 N, montrant d'excellentes performances globales. Dans un environnement humide de 60 %, le coefficient de frottement du WC5MoS₂ s'élève à 0,165 ± 0,01, mais il peut être ramené à 0,16 ± 0,01 par polissage de surface (Ra < 0,05 μm). Une optimisation future peut être obtenue en contrôlant la teneur en MoS₂ à 4-6 %, en limitant la teneur en C à 2-4 %, en affinant les grains à 0,3 μm, en ajustant la température de frittage à 1 380 °C-1 420 °C et en développant un revêtement résistant à l'humidité pour réduire le coefficient de frottement à 0,12 et l'adhérence à < 0,5 N, répondant ainsi aux exigences élevées des moteurs d'aviation et des dispositifs médicaux.

Les performances de lubrification du carbure cimenté WCTiCNi sont influencées par la teneur en MoS₂ (5 %), la teneur en C (3 %), la granulométrie (0,51 μm), la température de frittage (1 400 °C) et l'humidité ambiante (< 50 %). 5 % de MoS₂ réduisent le coefficient de frottement à < 0,2, 3 % de C réduisent l'adhérence, des grains fins et un frittage à température modérée assurent la stabilité du film de transfert, et une humidité élevée augmente le frottement. Basé sur le WC5MoS₂, ses performances sont supérieures à celles du WC10MoS₂, et l'effet de lubrification peut être encore amélioré par l'optimisation du rapport et du revêtement à l'avenir.

9.3.2.4 Optimisation des lubrifiants solides à base de carbure cimenté (MoS₂, C)

Afin d'obtenir un coefficient de frottement < 0,2 ± 0,01 pour les lubrifiants solides en carbure cimenté, tout en tenant compte des performances anti-adhérentes (force d'adhérence < 0,8 N ± 0,1 N) et de la stabilité mécanique (dureté > HV 1500, K_{1c} > 10 MPa·m^{1/2}), une stratégie globale d'optimisation des lubrifiants, d'ajustement du procédé de frittage, de contrôle des grains et de traitement de surface est nécessaire. Ces mesures d'optimisation visent à renforcer l'effet autolubrifiant du MoS₂ et du C, à répondre aux exigences de faible frottement de la coupe à grande vitesse (> 500 m/min), de l'usinage à sec et du formage de moules, tout en préservant l'intégrité structurelle de la matrice WC, offrant ainsi un support fiable pour des applications telles que les moules électroniques, les équipements marins et les composants aéronautiques. Ce qui suit est une description détaillée du schéma d'optimisation du point de vue des paramètres du procédé, de la microstructure et des caractéristiques de surface, et sa faisabilité est vérifiée en combinant les résultats réels.

(1) Optimisation des lubrifiants

L'optimisation du lubrifiant est essentielle pour réduire le coefficient de frottement. La teneur en MoS₂ est fixée à 5 % ± 0,1 %, et sa structure feuilletée (espacement intercouche 6,2 Å ± 0,1 Å) ainsi que sa faible force de cisaillement (< 1 MPa ± 0,1 MPa) réduisent efficacement la résistance au frottement en formant un film de transfert (épaisseur 10 nm ± 1 nm), et le coefficient de frottement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

peut être réduit à $0,15 \pm 0,01$. La teneur en C est contrôlée à $3 \% \pm 0,1 \%$, et sa structure de liaison sp^2 (énergie de liaison CC $600 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$) assure un glissement lamellaire (énergie de glissement $0,01 \text{ eV} \pm 0,001 \text{ eV}$), réduisant la force d'adhérence à $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, ce qui est particulièrement adapté au traitement des matériaux collants. L'analyse SEM montre que MoS_2 et C sont uniformément répartis dans la matrice WC (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), avec un taux de couverture $> 90 \% \pm 2 \%$, évitant la diminution de la ténacité (K_{1c} diminue de 10 à 15 %) causée par une teneur excessive ($> 10 \% \text{ MoS}_2$ ou $> 5 \% \text{ C}$). L'ajout de traces d'inhibiteurs (tels que VC, $< 1 \%$) peut optimiser davantage la compatibilité des lubrifiants avec le WC et améliorer la stabilité du film lubrifiant.

(2) Procédé de frittage

Le processus de frittage affecte directement l'intégrité du lubrifiant et la densité du matériau. La température recommandée est de $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ et la pression de $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$, obtenue par pressage à chaud. 1400°C est inférieure à la température de décomposition du MoS_2 ($> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), ce qui garantit que le lubrifiant ne subit pas de décomposition thermique. L'observation au MEB montre que les particules de MoS_2 et de C maintiennent une distribution stable (écart $< 0,1 \%$), la densité atteint $99 \% \pm 0,1 \%$ et la porosité est $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$. Une pression élevée (50 MPa) favorise l'enrobage du lubrifiant dans la limite de phase WC, formant un réseau de lubrification continu et réduisant la chaleur de frottement ($< 100^\circ\text{C}$). Comparé au frittage sous vide traditionnel, le procédé de pressage à chaud évite la décomposition du lubrifiant ($> 5 \% \pm 1 \%$) due à une température élevée ($> 1450^\circ\text{C}$). Le chauffage par paliers (préchauffage à 1200°C puis montée à 1400°C) permet également de réduire les contraintes thermiques et d'assurer l'équilibre entre lubrification et dureté ($> \text{HV } 1500$). L'atmosphère protectrice Ar prévient également l'oxydation et améliore la stabilité à long terme du film lubrifiant.

(3) Contrôle des grains

Un contrôle précis de la granulométrie est un moyen important d'optimiser les performances de lubrification. L'objectif est de la contrôler à $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. La capacité de charge du lubrifiant et la stabilité du film de transfert sont améliorées grâce à des joints de grains fins (densité $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$). L'analyse SEM montre que la taille des grains de $0,51 \mu\text{m}$ permet aux particules de MoS_2 et de C d'être uniformément réparties aux joints de grains, la couverture du film de transfert est $> 90 \% \pm 2 \%$, le coefficient de frottement reste $< 0,2 \pm 0,01$ et la force d'adhérence est $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. Si la taille des grains dépasse $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, le nombre de joints de grains diminue, la couverture du film de transfert diminue ($< 85 \%$), le coefficient de frottement peut augmenter de $10 \% \pm 2 \%$ et la force d'adhérence s'élève à plus de 1 N. Le raffinement des grains est obtenu en ajoutant des inhibiteurs (tels que VC, $0,5 \%-1 \%$) et en prolongeant le temps de broyage à boulets ($40 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$). À l'avenir, les nanoparticules ($< 0,3 \mu\text{m}$) pourront être explorées pour améliorer encore l'efficacité de la lubrification et s'adapter aux conditions de travail à forte charge ($> 200 \text{ N}$).

(4) Traitement de surface

Le traitement de surface optimise les performances de lubrification grâce à la technologie de polissage. Il est recommandé de contrôler la rugosité de surface (R_a) à $< 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ et d'utiliser un polissage diamanté ou mécano-chimique (CMP) pour éliminer les défauts de surface et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les microfissures. La surface plane réduit le contact direct de la paire de frottement, améliore l'adhérence du film de transfert MoS₂ (couverture > 95 % ± 2 %), réduit le coefficient de frottement à 0,15 ± 0,01 et réduit encore l'adhérence à < 0,7 N ± 0,1 N. Après le polissage, un nettoyage par ultrasons est combiné pour éliminer les résidus, le MEB vérifie l'uniformité de la surface (écart < 0,1 %) et réduit l'augmentation du coefficient de frottement (< 5 % ± 1 %) due à l'humidité (> 50 %). Le traitement de surface favorise également la dissipation rapide de la chaleur de frottement (< 90 °C) et prolonge la durée de vie de l'outil. Dans le formage de moules, un Ra < 0,05 µm réduit considérablement la force de démoulage (< 10 N ± 1 N) et améliore la qualité de surface de la pièce. À l'avenir, un revêtement TiN (épaisseur 2 µm) ou une nitruration plasma pourraient être introduits pour améliorer la résistance à l'usure de la surface et la durabilité de la lubrification.

(5) Effet d'optimisation complet et vérification de l'application

Grâce à la stratégie ci-dessus, le WC5MoS₂C3 (MoS₂ 5 %, C 3 %) avec frittage par pressage à chaud à 1400 °C, granulométrie 0,51 µm et Ra < 0,05 µm, a atteint un coefficient de frottement de 0,15 ± 0,01, une adhérence de 0,7 N ± 0,1 N, une dureté HV de 1550 ± 30, K_{1c} 10 MPa·m^{1/2} ± 0,5, meilleur que la valeur cible. En coupe à grande vitesse (500 m/min), la durée de vie de l'outil est augmentée de 30 % et la chaleur de frottement est < 90 °C, répondant aux besoins du traitement à sec ; dans le formage de moules, la force de démoulage est réduite à 8 N, réduisant l'adhérence du plastique ; dans les équipements marins, une faible adhérence permet plus de cinq ans de service. Comparé au WC10Co (coefficient de frottement 0,5 ± 0,05, adhérence > 2 N), le système WCTiCNi présente des avantages significatifs. À l'avenir, des nanolubrifiants ou des revêtements multicouches pourront être utilisés pour réduire encore le coefficient de frottement à 0,12 et l'adhérence à < 0,5 N, afin de répondre aux exigences élevées des moteurs d'aviation et des dispositifs médicaux.

(6) Contrôle environnemental et développement futur

Lors des essais et de l'application, l'humidité ambiante doit être contrôlée entre 30 et 50 % afin d'éviter une augmentation du coefficient de frottement (10 % ± 2 %) causée par une valeur supérieure à 50 % ± 5 %. Le frittage protégé par de l'argon et les revêtements résistants à l'humidité (tels que SiO₂, < 1 %) peuvent réduire l'impact de l'humidité et maintenir les performances de lubrification. À l'avenir, des simulations de lubrification dynamique (telles que des essais de rotation à grande vitesse) et des essais d'endurance à long terme (> 1 000 heures) pourront être introduits, et la technologie de projection plasma pourra être utilisée pour augmenter l'épaisseur de la couche de lubrification à 15 µm, optimiser les performances dans les environnements à haute température (> 800 °C) ou à forte charge (> 200 N), et élargir son potentiel d'application dans les secteurs de l'énergie et des machines lourdes.

Le lubrifiant solide au carbure cémenté optimise le coefficient de frottement < 0,2 grâce à 5 % de MoS₂ et 3 % de C. Le frittage à chaud à 1 400 °C assure la stabilité du lubrifiant. Les grains de 0,51 µm améliorent l'effet de film de transfert. Le traitement de surface Ra < 0,05 µm réduit l'adhérence. Prenons l'exemple du WC5MoS₂C3, dont les performances sont supérieures à celles du WC10Co. À l'avenir, grâce aux nanotechnologies et aux améliorations des revêtements, il pourra mieux répondre aux exigences des conditions de travail extrêmes.

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

9.3.2.3 Applications techniques des lubrifiants solides au carbure cémenté (MoS_2 , C)

Grâce à l'utilisation de MoS_2 et de C comme lubrifiants solides, le carbure cémenté autolubrifiant améliore considérablement ses performances dans des conditions de travail à faible frottement et à haute durabilité, répondant ainsi aux diverses exigences de l'industrie moderne en matière d'efficacité de traitement et de protection de l'environnement. Grâce à son excellent coefficient de frottement ($< 0,2 \pm 0,01$) et à son adhérence ($< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$), ce matériau présente d'excellentes performances dans des applications telles que la découpe à grande vitesse, le traitement à sec et le formage de moules, ce qui non seulement prolonge la durée de vie des outils et des moules, mais réduit également la consommation d'énergie et l'accumulation de chaleur pendant le traitement. L'étude suivante détaille sa valeur ajoutée technique en se basant sur des scénarios d'application spécifiques, des avantages en termes de performances et des cas concrets, et analyse sa contribution à l'efficacité industrielle et au développement durable.

(1) Coupe à grande vitesse

Dans le domaine de l'usinage à grande vitesse, le WC5MoS_2 est un choix idéal grâce à ses excellentes propriétés autolubrifiantes. La granulométrie est contrôlée à $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, ce qui garantit une intégration uniforme des particules de MoS_2 dans la matrice WC (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), formant un film de transfert stable (épaisseur $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), et le coefficient de frottement est réduit à $0,15 \pm 0,01$. L'analyse MEB montre que la couverture du film de transfert est supérieure à $90 \% \pm 2 \%$, ce qui réduit considérablement le contact direct entre les copeaux et la surface de l'outil et prolonge sa durée de vie de plus de $5\,000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$, dépassant largement celle de l'outil WC10Co traditionnel (durée de vie d'environ $3\,000 \text{ m}$). Cette performance est particulièrement importante dans le traitement de matériaux à haute dureté (tels que les alliages de titane) ou dans des conditions de grande vitesse ($> 500 \text{ m/min}$), réduisant le taux d'usure et la force de coupe, améliorant la finition de surface et réduisant l'utilisation de liquide de refroidissement, ce qui est conforme à la tendance de la fabrication verte.

(2) Traitement à sec

Il offre de bonnes performances grâce à sa faible adhérence et à ses capacités de gestion thermique. Le polissage de la surface à $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ réduit les défauts de surface et les microfissures. La structure de liaison sp^2 du C (énergie de glissement $0,01 \text{ eV} \pm 0,001 \text{ eV}$) forme un film lubrifiant uniforme. L'adhérence est réduite à $0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, ce qui est particulièrement adapté à l'usinage de matériaux collants tels que les alliages d'aluminium ou le cuivre. La chaleur de frottement est contrôlée à $< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, et l'observation au MEB montre que l'épaisseur du film lubrifiant est d'environ 5 à $10 \mu\text{m}$, ce qui dissipe efficacement la chaleur et empêche l'adhérence à haute température, prolongeant ainsi la durée de vie de l'outil d'environ 20 à 30% par rapport aux matériaux traditionnels. L'usinage à sec sans liquide de refroidissement réduit la pollution de l'environnement et les coûts de traitement, et est largement utilisé dans la fabrication de pièces automobiles et de composants électroniques, démontrant le potentiel du carbure cémenté autolubrifiant dans la protection de l'environnement et le traitement à haute efficacité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) Formage de moules

Dans les applications de formage de moules, le WC5MoS₂ est privilégié pour sa faible force de démoulage et sa longue durée de vie. La structure feuilletée du MoS₂ (espacement intercouches de $6,2 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) réduit le coefficient de frottement grâce à de faibles forces de van der Waals ($0,1 \text{ eV} \pm 0,01 \text{ eV}$). La force de démoulage est réduite à $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, ce qui réduit l'adhérence des pièces en plastique ou en métal à la surface du moule et améliore la qualité de surface des pièces moulées. L'analyse SEM montre que la couverture du film de transfert de lubrifiant est $> 90 \% \pm 2 \%$, ce qui permet une durée de vie du moule supérieure à 10^6 fois $\pm 10^5$ fois, dépassant largement celle du moule WC10Co (durée de vie d'environ 5×10^5 fois). Cette performance est exceptionnelle dans le moulage par injection et l'emboutissage de précision, comme la fabrication de boîtiers de téléphones portables et de tableaux de bord d'automobiles, réduisant les défauts de démoulage et la fréquence de maintenance, et améliorant considérablement l'efficacité de la production et les avantages économiques.

(4) Revêtement de pièces aéronautiques

Le WC10MoS₂ a également été étendu au domaine des revêtements de composants aéronautiques, notamment pour les revêtements anti-usure des aubes de turbine et des moteurs. Son faible coefficient de frottement ($0,15 \pm 0,01$) réduit l'usure due aux flux d'air à grande vitesse et au frottement des particules. La granulométrie de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ assure une répartition uniforme des lubrifiants et prolonge la durée de vie à plus de 6 000 heures. La stabilité à haute température du MoS₂ ($> 400 \text{ }^\circ\text{C}$) maintient l'effet lubrifiant dans l'environnement des moteurs d'avion, et la chaleur de frottement est inférieure à $100 \text{ }^\circ\text{C}$, ce qui améliore la résistance à la fatigue des composants et réduit les coûts de maintenance. Il est adapté aux exigences de fiabilité en vol à haute altitude.

(5) Outils de forage pétrolier

Dans les outils de forage pétrolier, le WC8MoS₂C (MoS₂ 5 %, C 3 %) est privilégié pour son excellente anti-adhérence et sa résistance à l'usure. Le film lubrifiant réduit l'adhérence entre le trépan et la roche, et la force d'adhérence est inférieure à $0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, ce qui prolonge la durée de vie du trépan d'environ 25 % par rapport aux matériaux traditionnels. En conditions de forage à sec, la chaleur de frottement est contrôlée à $< 100 \text{ }^\circ\text{C}$. L'effet synergique du MoS₂ et du C réduit la résistance à la coupe et améliore l'efficacité du forage, en particulier dans les formations rocheuses soufrées ou très dures, réduisant ainsi la fréquence de remplacement et les coûts d'exploitation.

(6) Dispositifs médicaux

Le WC5MoS₂ s'impose également dans le domaine des dispositifs médicaux, tels que les scalpels orthopédiques et les forets dentaires. Son coefficient de frottement de $0,15 \pm 0,01$ et son adhérence de $0,7 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$ garantissent une coupe à faible frottement, réduisant ainsi les lésions tissulaires et l'adhérence. Le polissage de surface à $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ améliore le tranchant du tranchant et sa durée de vie est supérieure à 5 000 fois supérieure, répondant ainsi aux exigences de haute précision en environnement stérile, améliorant ainsi la sécurité chirurgicale et la durabilité des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

instruments.

(7) Avantages complets et applications étendues

Ces applications démontrent pleinement la supériorité du carbure cimenté autolubrifiant pour réduire le frottement et l'adhérence. Il prolonge la durée de vie des outils en usinage à grande vitesse, réduit l'impact environnemental lors de l'usinage à sec, améliore l'efficacité de la production lors du formage de moules, renforce la durabilité des composants des revêtements aéronautiques, optimise l'efficacité opérationnelle des outils de forage pétrolier et garantit la qualité chirurgicale des dispositifs médicaux. Comparé au WC10Co (coefficient de frottement $0,5 \pm 0,05$, adhérence $> 2 \text{ N}$), le système WCTiCNi présente un coefficient de frottement réduit d'environ 70 % et l'adhérence de plus de 50 %, ce qui améliore considérablement la précision d'usinage et la durée de vie des outils. De plus, ses propriétés autolubrifiantes favorisent de nouvelles applications, telles que les couches résistantes à l'usure des voies ferrées (le WC8MoS₂C réduit les pertes par frottement entre les rails et les essieux) ; et l'électronique portable (la faible adhérence du WC3C permet la fabrication de composants conducteurs flexibles). À l'avenir, son potentiel d'application dans les domaines de l'énergie, de l'aviation et de la médecine pourra être encore élargi grâce à des nano-lubrifiants ou des revêtements multicouches.

Le carbure cimenté autolubrifiant est particulièrement performant pour l'usinage à grande vitesse, l'usinage à sec, le formage de moules, les revêtements aéronautiques, les outils de forage pétrolier et les dispositifs médicaux. Le coefficient de frottement du WC5MoS₂ est de $0,15 \pm 0,01$ et sa durée de vie est supérieure à 5 000 μm . L'adhérence du WC3C est de 0,8 N et sa chaleur de frottement est inférieure à 100 °C. La force de démoulage du WC5MoS₂ est inférieure à 10 N et sa durée de vie est supérieure à 10⁶ fois, ce qui confirme l'efficacité de l'usinage et l'amélioration de la durée de vie grâce à l'optimisation de la lubrification. À l'avenir, grâce à l'innovation des matériaux, il pourra répondre à un plus large éventail de besoins techniques.

9.3.2 Texture de surface et mécanisme de lubrification du carbure cimenté

9.3.2.1 Aperçu des principes et technologies de la texture de surface et du mécanisme de lubrification du carbure cimenté

La conception de la texture de surface du carbure cimenté améliore considérablement ses propriétés autolubrifiantes et anti-adhérentes grâce à l'introduction de microstructures spécifiques à la surface du matériau. La profondeur de texture est fixée à $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ et l'espacement est compris entre 50 et $100 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$. Ces structures texturées réduisent efficacement le coefficient de frottement ($< 0,2 \pm 0,01$) et l'adhérence ($< 1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$) en stockant des lubrifiants solides (tels que MoS₂ et C) et en capturant les copeaux d'usure (taille $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), répondant ainsi aux exigences de faible frottement de l'usinage à grande vitesse, de l'usinage à sec et du formage de moules. La conception de la texture est basée sur la théorie de la courbe de Stribeck. En optimisant la lubrification dynamique des fluides, l'épaisseur du film d'huile est d'environ $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, ce qui améliore l'effet de lubrification tout en maintenant la résistance à l'usure (taux d'usure $< 0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm$

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

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

0,01 mm³/N·m) et la dureté (> HV 1500 ± 30). Par rapport à la surface non texturée, la structure texturée réduit non seulement le contact direct de la paire de frottement, mais capture également les débris d'usure par des micro-rainures ou des piqûres, prévenant ainsi l'usure secondaire et prolongeant la durée de vie de l'outil. L'objectif est d'optimiser la lubrification et la résistance à l'usure de manière synergique, ce qui est adapté aux applications exigeantes telles que les moules électroniques, les composants aéronautiques et les outils de forage pétrolier.

La texture est obtenue par traitement laser, à l'aide d'un dispositif laser d'une longueur d'onde de 1064 nm ± 1 nm et d'une puissance de 10 W ± 0,1 W, avec une précision de ± 0,1 µm afin de garantir la cohérence de la profondeur et de l'espacement de la texture. Par exemple, le coefficient de frottement de l'échantillon WC5MoS₂ est réduit à 0,12 ± 0,01 dans des conditions de profondeur de texture de 5 µm ± 0,1 µm, ce qui est meilleur que l'échantillon non texturé (0,15 ± 0,01), et la force d'adhérence est réduite à 0,7 N ± 0,1 N, ce qui confirme que la texture de surface améliore significativement les performances de lubrification. Cette section effectuera une analyse détaillée des aspects du mécanisme de lubrification, de la technologie de traitement et de l'application technique afin d'explorer comment la conception de la texture peut optimiser le frottement et la durabilité du carbure cimenté.

9.3.2.2 Technologie de traitement de la texture de surface du carbure cimenté

Le traitement de texture utilise la technologie laser. Le laser Nd:YAG, d'une longueur d'onde de 1064 nm ± 1 nm, permet une gravure précise à une puissance de 10 W ± 0,1 W. La vitesse de balayage est contrôlée à 100 mm/s ± 1 mm/s, et la précision atteint ± 0,1 µm. Une fois les paramètres laser optimisés, la profondeur de texture de 110 µm ± 0,1 µm et l'espacement de 50 à 100 µm ± 1 µm forment une microstructure uniforme. Le MEB vérifie que le bord de la texture est lisse (Ra < 0,05 µm ± 0,01 µm) afin d'éviter la concentration de contraintes. Pendant le traitement, l'atmosphère protectrice d'Ar empêche l'oxydation du MoS₂ (température de décomposition > 1200 °C ± 10 °C) et assure la stabilité du lubrifiant. Comparé au traitement mécanique, le procédé laser réduit la zone affectée thermiquement (< 10 µm) et maintient la dureté de la matrice WC (> HV 1500 ± 30). Un traitement thermique ultérieur (par exemple, un revenu à 800 °C ± 10 °C) élimine les contraintes résiduelles et améliore l'adhérence entre la texture et la matrice. Par exemple, après texturation laser, le coefficient de frottement du WC5MoS₂ est réduit de 0,15 ± 0,01 à 0,12 ± 0,01, et le taux d'usure est < 0,06 mm³/N·m ± 0,01 mm³/N·m, démontrant l'efficacité de l'optimisation du procédé.

Analyse de la texture de surface du carbure cimenté et du mécanisme de lubrification

La texture de surface du carbure cimenté améliore considérablement ses propriétés d'autolubrification et anti-usure grâce à la conception de sa microstructure. Cette texture réduit le coefficient de frottement et l'usure de surface en augmentant le stockage du lubrifiant, en optimisant la formation du film d'huile et en capturant les débris d'usure, offrant ainsi une lubrification efficace pour des applications telles que l'usinage à grande vitesse, l'usinage à sec et le formage de moules. Cette section analyse en profondeur le mécanisme de lubrification de la texture, explore son influence sur le coefficient de frottement, le taux d'usure et la force de cisaillement, et combine observations microscopiques et données expérimentales pour révéler comment la profondeur,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'espacement et la technologie de traitement de la texture interagissent avec le film de transfert de MoS₂ pour optimiser la lubrification, et propose des pistes d'optimisation des performances.

9.3.2.3 Texture de surface et mécanisme de lubrification du carbure cémenté

La texture de surface améliore considérablement les performances autolubrifiantes en augmentant la capacité de stockage du lubrifiant ($> 90 \% \pm 2 \%$). Les micro-rainures ou piqûres stockent les particules de MoS₂ et de C pour former un film d'huile continu (épaisseur $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), ce qui réduit le coefficient de frottement à $0,12 \pm 0,01$. Ce film d'huile assure une lubrification hydrodynamique entre les paires de frottement et réduit le contact direct avec le métal. La courbe de Stribeck montre qu'en conditions de lubrification mixte, la structure de la texture optimise la distribution du lubrifiant et réduit la résistance au frottement. La texture réduit également l'usure à trois corps en capturant les débris d'usure (taille $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), et le taux d'usure est contrôlé à $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, en particulier pour la coupe à grande vitesse (par exemple $> 500 \text{ m/min}$). Français La profondeur de texture de $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ optimise l'effet dynamique des fluides, la pression locale $> 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$, et améliore la capacité portante du film d'huile ; l'espacement de $50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ assure l'uniformité du film d'huile (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) pour éviter un déficit de lubrification local. Le film de transfert de MoS₂ (épaisseur $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) réduit encore la force de cisaillement ($< 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$), et sa structure en couches (espacement des couches $6,2 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) glisse dans la texture avec une couverture $> 90 \% \pm 2 \%$ et des forces d'adhérence réduites de manière synergique ($< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$).

9.3.2.4 Observation microscopique et vérification de la texture de surface du carbure cémenté

Français L'analyse SEM a montré que les débris d'usure sur la surface texturée étaient significativement réduits ($< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), indiquant que l'effet de capture de texture était efficace, réduisant l'usure secondaire et les rayures de surface. La détection EDS a confirmé que MoS₂ était enrichi dans la zone de texture (rapport Mo:S $\sim 1:2 \pm 0,1$), vérifiant la stabilité chimique du lubrifiant. XPS a en outre montré la position du pic S2p de MoS₂ ($\sim 162 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), confirmant la source de ses propriétés de faible cisaillement. Après traitement au laser, la rugosité de surface $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, l'intégrité de la texture $> 95 \% \pm 2 \%$, et SEM a observé que le bord de la texture était lisse sans zone affectée thermiquement évidente ($< 10 \mu\text{m}$), assurant une adhérence uniforme du lubrifiant et la stabilité du film d'huile. Par rapport à la surface non texturée ($R_a \sim 0,5 \mu\text{m}$), la faible rugosité de la surface texturée améliore l'adhérence du lubrifiant et prolonge la durée de vie de l'outil.

9.3.2.5 Effet des paramètres de texture de surface du carbure

La profondeur de texture a un double effet sur la lubrification et la résistance à l'usure. Une profondeur de $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ optimise l'effet hydrodynamique, et une pression $> 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$ favorise la stabilité du film d'huile, avec un coefficient de frottement de $0,12 \pm 0,01$. Cependant, lorsque la profondeur de texture dépasse $10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, le taux d'usure augmente d'environ 10 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 2\%$. En effet, des textures trop profondes peuvent entraîner une concentration de contraintes ou une accumulation excessive de lubrifiant. L'analyse MEB montre qu'à une profondeur $> 10\ \mu\text{m}$, l'efficacité de capture des débris d'usure diminue ($< 85\%$) et l'usure locale augmente. Un espacement de $50\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ assure une distribution uniforme du film d'huile (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), tandis qu'un espacement trop important ($> 100\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$) peut réduire l'efficacité du stockage du lubrifiant et faire monter le coefficient de frottement à $0,18 \pm 0,01$. À l'avenir, la lubrification et la résistance à l'usure pourront être équilibrées grâce à une conception de texture multi-échelles (par exemple, une microtexture de $5\ \mu\text{m}$ combinée à une nanotexture de $100\ \text{nm}$).

(1) Comportement de frottement et influence de la vitesse

Le coefficient de frottement présente une certaine régularité avec la vitesse de glissement. Lorsque la vitesse est $> 0,5\ \text{m/s} \pm 0,01\ \text{m/s}$, le coefficient de frottement diminue légèrement ($< 5\% \pm 1\%$). Cela est dû au fait que la formation dynamique du film de transfert de MoS_2 est accélérée à grande vitesse, l'épaisseur du film d'huile augmente légèrement ($> 1,1\ \mu\text{m}$) et la force de cisaillement est encore réduite ($< 0,9\ \text{MPa}$). L'observation au MEB montre qu'après un frottement à grande vitesse, le taux de couverture du film de transfert augmente à $> 95\% \pm 2\%$ et la force d'adhérence diminue à $0,7\ \text{N} \pm 0,1\ \text{N}$. Cependant, une vitesse excessive ($> 1\ \text{m/s} \pm 0,01\ \text{m/s}$) peut endommager le film d'huile ($< 90\%$) et le coefficient de frottement augmente à nouveau. La profondeur de texture et la teneur en lubrifiant doivent être optimisées pour s'adapter aux conditions de travail à grande vitesse. Le contrôle de la chaleur de friction ($< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) bénéficie de la dissipation thermique de la texture, ce qui prolonge la durabilité de l'outil.

(2) Direction de la vérification et de l'optimisation de l'application

Le mécanisme de lubrification de la texture a été vérifié dans des applications d'ingénierie. En usinage à grande vitesse, le coefficient de frottement du WC5MoS_2 (profondeur de texture $5\ \mu\text{m}$) est de $0,12 \pm 0,01$, la durée de vie de l'outil est $> 5\ 000\ \text{m} \pm 500\ \text{m}$ et l'effort de coupe est réduit ; en usinage à sec, l'adhérence du WC3C est de $0,7\ \text{N} \pm 0,1\ \text{N}$, la chaleur de frottement est $< 100\ ^\circ\text{C} \pm 1\ ^\circ\text{C}$ et il est adapté à l'usinage des alliages d'aluminium ; en formage de moules, la force de démoulage du WC5MoS_2 est $< 10\ \text{N} \pm 1\ \text{N}$ et sa durée de vie est $> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois. Des optimisations futures peuvent être obtenues en ajustant la profondeur de texture à $7\text{-}10\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ pour améliorer la capacité de charge du film d'huile et réduire le coefficient de frottement à $0,1 \pm 0,01$; en utilisant le nano-usinage laser (longueur d'onde $532\ \text{nm}$) pour affiner la texture à $100\ \text{nm}$ et réduire le taux d'usure à $< 0,04\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$; combiné avec un revêtement MoS_2 pulvérisé au plasma (épaisseur $15\ \mu\text{m}$), il peut s'adapter aux environnements à haute température ($> 800^\circ\text{C}$) ou à forte charge ($> 200\ \text{N}$), tels que les moteurs d'avion et les machines lourdes.

Réduit le coefficient de frottement à $0,12 \pm 0,01$ en stockant le lubrifiant ($> 90\%$) et en capturant les débris d'usure. La profondeur de $5\ \mu\text{m}$ optimise l'effet hydrodynamique. Le film de transfert MoS_2 ($10\ \text{nm}$) réduit la force de cisaillement. Les microscopes à balayage électronique (MEB) et les spectroscopies électrochimiques (EDS) vérifient l'effet lubrifiant. Le traitement laser garantit un $\text{Ra} < 0,1\ \mu\text{m}$. À l'avenir, la nanotexturation et l'optimisation du revêtement permettront d'améliorer encore ses performances dans des conditions de travail extrêmes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.3.2.6 Analyse des facteurs affectant la texture de surface et la lubrification du carbure cémenté

Les performances de lubrification de la texture de surface en carbure cémenté sont influencées par une combinaison de facteurs. Ces facteurs déterminent son coefficient de frottement et sa résistance à l'usure lors de l'usinage à grande vitesse, de l'usinage à sec et du formage de moules, en modifiant la répartition du lubrifiant, la stabilité du film d'huile, la qualité d'usinage et les conditions environnementales. Des paramètres clés tels que la profondeur de la texture, l'espacement, la teneur en lubrifiant, la précision d'usinage et l'humidité ambiante influencent directement l'équilibre entre l'effet d'autolubrification et les propriétés mécaniques. L'analyse du mécanisme et de l'interaction de ces facteurs permet d'optimiser la conception et la technologie d'usinage de la texture pour répondre aux besoins de scénarios exigeants tels que les moules électroniques, les composants aéronautiques et les outils de forage pétrolier. Cette section détaille l'impact de chaque facteur sur les performances de lubrification en fonction de ses caractéristiques, des données expérimentales et des cas d'application, et propose des suggestions d'amélioration.

(1) Profondeur de texture

La profondeur de texture a un effet significatif sur la lubrification et les performances d'usure. Lorsque la profondeur est de $5\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$, le coefficient de frottement reste faible ($< 0,12 \pm 0,01$). En effet, une profondeur appropriée optimise la lubrification hydrodynamique. L'épaisseur du film d'huile est d'environ $1\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ et la pression est $> 1\ \text{MPa} \pm 0,1\ \text{MPa}$ pour soutenir la capacité de charge du lubrifiant. L'analyse SEM montre qu'une profondeur de $5\ \mu\text{m}$ garantit que le film de transfert de MoS_2 (épaisseur $10\ \text{nm} \pm 1\ \text{nm}$) a une couverture $> 90\ \% \pm 2\ \%$, et le taux d'usure est contrôlé à $0,05\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$. Cependant, lorsque la profondeur de texture dépasse $10\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$, le taux d'usure augmente d'environ $10\ \% \pm 2\ \%$. La raison en est qu'une texture trop profonde entraîne une concentration de contraintes ou une accumulation excessive de lubrifiant, ce qui réduit l'efficacité de capture des copeaux ($< 85\ \%$) et intensifie l'usure locale. Par exemple, le taux d'usure du WC5MoS_2 avec une profondeur de texture de $15\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ atteint $0,08\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, tandis que $5\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ n'est que de $0,05\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, ce qui indique que la profondeur doit être contrôlée avec précision pour équilibrer la lubrification et la résistance à l'usure.

(2) Espacement des textures

L'espacement des textures est essentiel à la stabilité du film d'huile et à l'uniformité de la lubrification. Un espacement de $50\ \text{à}\ 100\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ assure une distribution uniforme du film d'huile (écart $< 0,1\ \% \pm 0,02\ \%$), un coefficient de frottement $< 0,12 \pm 0,01$ et une force d'adhérence $< 0,8\ \text{N} \pm 0,1\ \text{N}$. Les observations au MEB montrent que les micro-rainures espacées de $50\ \mu\text{m}$ stockent efficacement les particules de MoS_2 et de C, et que la couverture du film de transfert est $> 90\ \% \pm 2\ \%$, ce qui répond aux exigences de coupe à grande vitesse et d'usinage à sec. Cependant, lorsque l'espacement est inférieur à $50\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$, le coefficient de frottement augmente d'environ $5\ \% \pm 1\ \%$, ce qui est dû au fait que la texture trop dense restreint l'écoulement du lubrifiant, l'épaisseur du

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

film d'huile est réduite ($< 0,9 \mu\text{m}$), le contact local augmente et la force d'adhérence peut atteindre $1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. Si l'espacement est trop grand ($> 100 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$), l'efficacité de stockage sera réduite et le coefficient de frottement augmentera à $0,18 \pm 0,01$. Un traitement au laser est nécessaire pour optimiser la distribution de l'espacement. À l'avenir, une conception d'espacement gradué pourra être utilisée pour améliorer l'uniformité de la lubrification.

(3) Lubrifiant

La teneur en lubrifiant affecte directement la qualité du film de transfert et ses propriétés mécaniques. Lorsque la teneur en MoS_2 est de $5 \% \pm 0,1 \%$, la couverture du film de transfert est élevée ($> 90 \% \pm 2 \%$), le coefficient de frottement est réduit à $0,12 \pm 0,01$ et la structure en couches (espacement intercouche $6,2 \text{ \AA}$) est de $\pm 0,1 \text{ \AA}$ réduit la force de cisaillement ($< 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$) par de faibles forces de van der Waals ($0,1 \text{ eV} \pm 0,01 \text{ eV}$). L'analyse EDS montre que le MoS_2 est enrichi ($\text{Mo:S} \sim 1:2 \pm 0,1$), ce qui renforce l'effet anti-adhérence. Cependant, lorsque la teneur en MoS_2 dépasse $10 \% \pm 0,1 \%$, la ténacité à la rupture (K_{1c}) diminue d'environ $10 \% \pm 2 \%$, car l'excès de lubrifiant entraîne un affaiblissement ou une agglomération des joints de grains ($> 0,1 \%$), augmentant le risque de microfissures. Une teneur en AC de $3 \% \pm 0,1 \%$ assure un glissement sp^2 (énergie de glissement $0,01 \text{ eV} \pm 0,001 \text{ eV}$) et une adhérence $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. Si la teneur en C est trop élevée ($> 5 \% \pm 0,1 \%$), la dureté diminuera ($> 10 \% \pm 2 \%$), et le rapport doit être optimisé. À l'avenir, des nano-lubrifiants pourront être introduits pour augmenter la couverture.

(4) Précision du traitement

La précision de l'usinage est essentielle à la qualité de la texture et à l'effet de lubrification. L'usinage avec une puissance laser de $10 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$ garantit une intégrité de la texture $> 95 \% \pm 2 \%$, une rugosité de surface $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, et le MEB vérifie que le bord de la texture est lisse et qu'il n'y a pas de zone affectée thermiquement ($< 10 \mu\text{m}$). L'usinage haute précision favorise l'adhérence du film de transfert MoS_2 , le coefficient de frottement reste à $0,12 \pm 0,01$ et le taux d'usure est $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$. Cependant, lorsque la puissance laser dépasse $20 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$, les dommages augmentent d'environ $5 \% \pm 1 \%$, le MEB observe des microfissures ($< 0,5 \mu\text{m}$) ou des zones de fusion ($> 15 \mu\text{m}$) sur les bords de la texture, la stabilité du film d'huile diminue ($< 90 \%$) et le coefficient de frottement augmente à $0,16 \pm 0,01$. L'optimisation nécessite un contrôle de la puissance et de la vitesse de balayage ($100 \text{ mm/s} \pm 1 \text{ mm/s}$), et des lasers multifaisceaux peuvent être utilisés à l'avenir pour améliorer la cohérence du traitement.

(5) Environnement

Les conditions environnementales ont un impact significatif sur les performances de lubrification. Lorsque l'humidité dépasse $50 \% \pm 5 \%$, le coefficient de frottement augmente d'environ $10 \% \pm 2 \%$. En effet, l'eau est adsorbée sur les surfaces MoS_2 et C, ce qui affaiblit la capacité de glissement intercouche et réduit la couverture du film de transfert ($< 85 \%$), tandis que la force d'adhérence augmente jusqu'à $1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. L'analyse au MEB montre que des traces d'oxydes ($< 0,1 \%$) apparaissent à la surface sous forte humidité, augmentant la résistance au frottement. Dans les environnements de traitement à sec ou marins, un contrôle de l'humidité entre 30% et 50% peut optimiser la lubrification. La couche de passivation NiO du Ni (épaisseur $\sim 10 \text{ nm}$) offre une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

protection dans les environnements à forte humidité, avec une perte de poids $< 0,06 \text{ mg/cm}^2$. À l'avenir, des revêtements anti-humidité (tels que TiN, épaisseur $2 \text{ }\mu\text{m}$) ou déshydratants (tels que SiO_2 , $< 1\%$) pourront être utilisés pour réduire l'impact de l'humidité et maintenir de faibles performances de frottement.

(6) Cas complets et directions d'optimisation

En prenant WC5MoS_2 comme exemple, dans les conditions de profondeur de texture $5 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$, espacement $50 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$, MoS_2 $5\% \pm 0,1\%$ et puissance laser $10 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$, le coefficient de frottement est de $0,12 \pm 0,01$ et le taux d'usure est de $0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, meilleur que $0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ à une profondeur de $15 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$. Français Dans un environnement d'humidité de 60% , le coefficient de frottement s'élève à $0,132 \pm 0,01$, mais peut être rétabli à $0,125 \pm 0,01$ par polissage à $R_a < 0,05 \text{ }\mu\text{m}$. Une optimisation future peut ajuster la profondeur de texture à $7\text{-}10 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ pour améliorer la capacité portante du film d'huile ; optimiser l'espacement à $40\text{-}60 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ pour améliorer l'uniformité de la lubrification ; contrôler la teneur en MoS_2 à $4\%\text{-}6\%$ pour éviter une diminution de la ténacité ; limiter la puissance du laser à $8\text{-}12 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$ pour réduire les dommages ; et développer un revêtement résistant à l'humidité pour s'adapter aux environnements à haute température ($> 800 \text{ }^\circ\text{C}$) ou à forte humidité ($> 70\%$).

Les performances de lubrification de la texture de surface en carbure cémenté dépendent de la profondeur de la texture ($5 \text{ }\mu\text{m}$), de l'espacement ($50\text{-}100 \text{ }\mu\text{m}$), de la teneur en MoS_2 (5%), de la précision d'usinage (10 W) et de l'humidité ambiante ($< 50\%$). Une profondeur de $5 \text{ }\mu\text{m}$ réduit le coefficient de frottement à $0,12$, tandis qu'une profondeur trop importante augmente le taux d'usure. À l'avenir, ses performances dans des conditions de travail extrêmes pourront être améliorées par l'optimisation des paramètres et des revêtements.

9.3.2.7 Stratégie d'optimisation de la texture de surface et de la lubrification du carbure cémenté

Pour obtenir un coefficient de frottement $< 0,2 \pm 0,01$ pour la texture de surface du carbure, tout en tenant compte des propriétés anti-adhérentes (force d'adhérence $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$) et de la résistance à l'usure (taux d'usure $< 0,06 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), ce qui doit être obtenu grâce à une stratégie globale de conception de texture, d'optimisation du lubrifiant, d'amélioration de la technologie de traitement et d'optimisation du traitement de surface. Ces mesures visent à renforcer l'effet autolubrifiant du MoS_2 et du C, répondant aux exigences de faible frottement de la coupe à grande vitesse, de l'usinage à sec et du formage de moules, tout en maintenant la dureté ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) et la ténacité ($K_{1c} > 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) de la matrice WC. Ce qui suit est une description détaillée du schéma d'optimisation à partir des aspects des paramètres de texture, du rapport de lubrifiant, de la technologie de traitement, du traitement de surface et des spécifications de test, et sa faisabilité est vérifiée en combinant les résultats réels.

(1) Conception de texture

La conception de la texture est au cœur de l'optimisation des performances de lubrification, avec

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

une profondeur recommandée de $5\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ et un espacement de $50\ \text{à}\ 100\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$. Cette profondeur forme un film d'huile stable (épaisseur $1\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$) par effet hydrodynamique, avec une pression $> 1\ \text{MPa} \pm 0,1\ \text{MPa}$, et le coefficient de frottement est réduit à $0,12 \pm 0,01$. L'analyse SEM montre que la couverture du film de transfert est $> 90\ \% \pm 2\ \%$. L'espacement de $50\text{-}100\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ assure une distribution uniforme du film d'huile (écart $< 0,1\ \% \pm 0,02\ \%$), capture les débris d'usure ($< 1\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$) et réduit l'usure à trois corps, avec un taux d'usure de $< 0,06\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$. Par rapport à une profondeur $> 10\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ (taux d'usure augmenté de $10\ \% \pm 2\ \%$), une profondeur de $5\ \mu\text{m}$ évite la concentration de contraintes et convient aux exigences de découpe à grande vitesse et de formage de moules.

(2) Lubrifiant

L'optimisation du lubrifiant améliore l'effet de lubrification. La teneur en MoS_2 est fixée à $5\ \% \pm 0,1\ \%$. Sa structure en couches (espacement intercouches $6,2\ \text{\AA} \pm 0,1\ \text{\AA}$) forme un film de transfert (épaisseur $10\ \text{nm} \pm 1\ \text{nm}$) grâce à de faibles forces de van der Waals ($0,1\ \text{eV} \pm 0,01\ \text{eV}$), et le coefficient de frottement est réduit à $0,12 \pm 0,01$. La teneur en C est contrôlée à $3\ \% \pm 0,1\ \%$, et sa structure de liaison sp^2 (énergie de glissement $0,01\ \text{eV} \pm 0,001\ \text{eV}$) réduit l'adhérence à $< 0,8\ \text{N} \pm 0,1\ \text{N}$. Le MEB vérifie que le lubrifiant est uniformément réparti (écart $< 0,1\ \% \pm 0,02\ \%$). Une concentration de $\text{MoS}_2 > 10\ \% \pm 0,1\ \%$ ou de C $> 5\ \% \pm 0,1\ \%$ peut entraîner une diminution de K_{1c} ($10\ \text{à}\ 15\ \%$). Des traces d'inhibiteurs (tels que VC, $< 1\ \%$) peuvent optimiser la compatibilité. À l'avenir, des nanolubrifiants pourraient être introduits pour améliorer la couverture.

(3) Technologie de traitement

Français La technologie de traitement utilise la technologie laser avec une longueur d'onde de $1064\ \text{nm} \pm 1\ \text{nm}$ et une puissance de $10\ \text{W} \pm 0,1\ \text{W}$, assurant une précision de texture de $\pm 0,1\ \mu\text{m}$ et une vitesse de balayage de $100\ \text{mm/s} \pm 1\ \text{mm/s}$. L'observation SEM montre que l'intégrité de la texture est $> 95\ \% \pm 2\ \%$ à une puissance de $10\ \text{W}$, $R_a < 0,1\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$, et qu'il n'y a pas de zone affectée thermiquement ($< 10\ \mu\text{m}$), ce qui favorise l'adhérence du film de transfert MoS_2 . Comparé à une puissance $> 20\ \text{W} \pm 0,1\ \text{W}$ (dommages augmentés de $5\ \% \pm 1\ \%$), $10\ \text{W}$ évitent les microfissures ($< 0,5\ \mu\text{m}$) ou les zones de fusion, et l'atmosphère protectrice d'Ar empêche l'oxydation du MoS_2 (température de décomposition $> 1200\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$). Un recuit ultérieur à $800\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$ élimine les contraintes et améliore la liaison entre la texture et le substrat.

(4) Traitement de surface

Traitement de surface Optimisez la lubrification par polissage, avec une rugosité recommandée de $R_a < 0,05\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$, et éliminez les défauts à l'aide d'un polissage au diamant ou d'un polissage mécano-chimique (CMP). Les surfaces planes améliorent l'adhérence des films de transfert MoS_2 (couverture $> 95\ \% \pm 2\ \%$), réduisent le coefficient de frottement à $0,12 \pm 0,01$ et l'adhérence $< 0,7\ \text{N} \pm 0,1\ \text{N}$. Le nettoyage par ultrasons après polissage élimine les résidus et le MEB vérifie l'uniformité (écart $< 0,1\ \%$), réduisant l'augmentation du frottement ($< 5\ \% \pm 1\ \%$) causée par l'humidité ($> 50\ \% \pm 5\ \%$). Dans le formage de moules, $R_a < 0,05\ \mu\text{m}$ réduit la force de démoulage ($< 10\ \text{N} \pm 1\ \text{N}$) et améliore la qualité de la pièce. À l'avenir, il pourra être combiné avec un revêtement TiN (épaisseur $2\ \mu\text{m}$) pour améliorer la résistance à l'usure.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) Spécifications des tests

L'essai est conforme à la norme ASTM G99, test de frottement et d'usure axe-disque, charge $10 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, vitesse $0,1 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ m/s}$, simulant des conditions de travail à basse vitesse. L'environnement est contrôlé à $25 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$, humidité $50 \% \pm 5 \%$, répété 3 fois et moyenné pour mesurer le coefficient de frottement et le taux d'usure. Dans ces conditions, le coefficient de frottement de l'échantillon WC5MoS₂C3 est de $0,12 \pm 0,01$ et le taux d'usure est de $0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, meilleur que l'échantillon non optimisé ($0,15 \pm 0,01$). En combinant SEM et EDS pour analyser la couverture du film de transfert et la distribution du lubrifiant, il peut être étendu aux tests à grande vitesse ($> 0,5 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ m/s}$) ou aux environnements à haute température ($> 400 \text{ °C}$) à l'avenir.

(6) Effet d'optimisation complet et vérification de l'application

Français Grâce à la stratégie ci-dessus, WC5MoS₂C3 a un coefficient de frottement de $0,12 \pm 0,01$, une force d'adhérence de $0,7 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$ et un taux d'usure de $0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ dans les conditions de profondeur de texture de $5 \text{ }\mu\text{m}$, pas de 50 à $100 \text{ }\mu\text{m}$, laser de 1064 nm et $R_a < 0,05 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, dureté $\text{HV } 1550 \pm 30$, $K_{1c} 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$. Durée de vie de l'outil $> 5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$ en coupe à grande vitesse ; chaleur de frottement $< 100 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ en usinage à sec ; durée de vie de l'outil $> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois en formage de matrice. Par rapport au WC10Co (coefficient de frottement de $0,5 \pm 0,05$), les performances après optimisation sont améliorées d'environ 75 %. À l'avenir, il pourra être adapté aux températures élevées ($> 800 \text{ °C}$) ou aux charges élevées ($> 200 \text{ N}$) grâce à la nanotexturation ou au revêtement multicouche.

(7) Contrôle environnemental et développement futur

L'humidité est contrôlée entre 30 et 50 % pour éviter toute augmentation ($10 \% \pm 2 \%$), la protection Ar et le revêtement anti-humidité (tel que SiO₂, $< 1 \%$) améliorent la stabilité. À l'avenir, des essais d'usure dynamique ($> 1 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ m/s}$) ou des essais de durabilité à long terme (> 1000 heures) pourraient être introduits, combinés à la projection plasma (épaisseur $15 \text{ }\mu\text{m}$), afin d'élargir les applications aéronautiques et énergétiques.

La texture de surface du carbure est optimisée avec une profondeur de $5 \text{ }\mu\text{m}$, un espacement de 50 à $100 \text{ }\mu\text{m}$, 5 % de MoS₂ et 3 % de C, un laser à 1064 nm et une $R_a < 0,05 \text{ }\mu\text{m}$ pour obtenir un coefficient de frottement $< 0,2$. Le test ASTM G99 vérifie cet effet. Prenons l'exemple du WC5MoS₂C3, dont les performances sont supérieures à celles du WC10Co, et qui pourraient être encore améliorées à l'avenir grâce aux nanotechnologies et aux revêtements.

9.3.2.8 Application technique de la texture de surface et de la lubrification du carbure cémenté

La texture de surface en carbure cémenté, associée à des lubrifiants MoS₂ et C, améliore considérablement ses performances autolubrifiantes, lui permettant de répondre efficacement à divers scénarios d'ingénierie exigeants. Cette texture réduit le coefficient de frottement ($< 0,2 \pm 0,01$) et l'adhérence ($< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$) en optimisant la formation du film d'huile et la capture des copeaux,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

prolongeant ainsi la durée de vie des outils et des composants, et répondant aux exigences des applications de coupe à grande vitesse, d'usinage à sec et de machines de précision. L'étude suivante détaille sa valeur ajoutée en ingénierie, basée sur des scénarios d'application spécifiques, des avantages en termes de performances et des cas concrets, et analyse sa contribution à l'efficacité et à la durabilité industrielles.

(1) Outils à grande vitesse

Dans les applications d'outillage à grande vitesse, le WC5MoS₂ offre d'excellentes performances grâce à ses excellentes propriétés autolubrifiantes. La profondeur de texture est fixée à $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, ce qui optimise la formation du film de transfert de MoS₂ (épaisseur $10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$), et le coefficient de frottement est réduit à $0,12 \pm 0,01$. L'analyse MEB montre que la couverture du film de transfert est supérieure à $90\% \pm 2\%$, ce qui réduit le contact direct entre les copeaux et la surface de l'outil et prolonge sa durée de vie de plus de $5\text{ 000 m} \pm 500\text{ m}$, dépassant largement celle d'un outil WC10Co traditionnel (durée de vie d'environ 3 000 m). Cette performance est particulièrement significative pour l'usinage de matériaux à haute dureté (tels que les alliages de titane ou l'acier inoxydable) ou à grande vitesse ($> 500\text{ m/min}$), réduisant les efforts de coupe et les taux d'usure, améliorant l'état de surface et réduisant l'utilisation de liquide de refroidissement, répondant ainsi aux exigences de fabrication verte.

(2) Moule sec

Dans le scénario de moulage sec, le WC3C est privilégié pour sa faible adhérence et sa longue durée de vie. L'espacement des textures est fixé à $50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ pour assurer une distribution uniforme du film d'huile (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$). La structure de liaison sp² du C (énergie de glissement $0,01\text{ eV} \pm 0,001\text{ eV}$) forme un film lubrifiant stable et l'adhérence est réduite à $0,8\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$. L'observation au MEB montre que la texture capture les débris d'usure ($< 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$), réduit l'usure secondaire et la durée de vie du moule dépasse 10^6 fois $\pm 10^5$ fois, dépassant largement celle du moule WC10Co (durée de vie d'environ 5×10^5 fois). Dans le moulage par injection à sec ou l'emboutissage, comme dans la fabrication de tableaux de bord d'automobiles ou de boîtiers électroniques, une faible adhérence réduit l'adhérence de la pièce et la chaleur de friction est contrôlée à $< 100\text{ }^\circ\text{C} \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$, ce qui améliore l'efficacité de la production et la qualité de surface, reflétant les avantages d'un traitement respectueux de l'environnement.

(3) Composants de roulement

Français Dans les applications de composants de roulement, le WC5MoS₂ présente une excellente durabilité et des propriétés de faible frottement, avec une surface polie à $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, une adhérence améliorée du film de transfert MoS₂ (couverture $> 95\% \pm 2\%$), et un coefficient de frottement stable de $0,15 \pm 0,01$. La profondeur de texture de $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ optimise la lubrification hydrodynamique, et l'épaisseur du film d'huile est d'environ $1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, ce qui réduit l'usure de la paire de frottement dans le roulement et a une durée de vie de plus de 10^4 heures $\pm 10^3$ heures, ce qui est mieux que les roulements en acier traditionnels (durée de vie d'environ 5000 heures). Ces performances sont exceptionnelles dans les moteurs d'avion, les systèmes de transmission automobile et les machines industrielles, réduisant la fréquence de maintenance et la consommation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'énergie, tandis que la couche de passivation NiO de Ni (épaisseur ~ 10 nm) offre une protection supplémentaire contre la corrosion dans les environnements à forte humidité et améliore la fiabilité.

(4) Revêtement de turbine d'aviation

Le revêtement texturé WC10MoS₂ est particulièrement performant dans les composants de turbines aéronautiques. Sa profondeur de texture de $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ et son espacement de $50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ réduisent les frottements causés par les flux d'air à grande vitesse et le frottement des particules. Son coefficient de frottement est de $0,12 \pm 0,01$ et sa durée de vie est prolongée à plus de 6 000 heures. La stabilité à haute température du MoS₂ ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) préserve l'effet lubrifiant dans l'environnement moteur. La chaleur de frottement est inférieure à $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui améliore la résistance à la fatigue du revêtement, réduit les coûts de maintenance des composants aéronautiques et convient aux conditions de vol à haute altitude.

(5) Outils de forage pétrolier

Les trépan texturés WC8MoS₂C (MoS₂ 5 %, C 3 %) sont performants en forage pétrolier, avec une profondeur de texture de $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ pour capturer les déblais de forage ($< 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$), une adhérence $< 0,8\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$ et une durée de vie du trépan augmentée d'environ 25 % par rapport aux matériaux conventionnels. En forage à sec, la chaleur de friction $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, le MoS₂ et le C réduisent de manière synergique la résistance à la coupe, et l'efficacité est améliorée dans les formations rocheuses soufrées ou à haute dureté, réduisant ainsi la fréquence de remplacement et les coûts d'exploitation.

(6) Dispositifs médicaux

Les scalpels texturés WC5MoS₂ présentent un potentiel dans le domaine médical. L'espacement des textures de $50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ et le $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ garantissent une coupe à faible frottement, un coefficient de frottement de $0,12 \pm 0,01$, une adhérence de $0,7\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$ et une réduction des lésions tissulaires. Leur durée de vie supérieure à 5 000 fois supérieure répond aux exigences de haute précision en environnement stérile et améliore la sécurité chirurgicale et la durabilité des instruments.

(7) Avantages complets et applications étendues

L'effet synergique de la texture de surface et du lubrifiant améliore considérablement les performances du carbure cimenté. Les outils à grande vitesse prolongent la durée de vie des outils, les moules secs améliorent l'efficacité de la production, les composants de roulements augmentent la durabilité, les revêtements aéronautiques réduisent les coûts de maintenance, les outils de forage pétrolier optimisent l'efficacité opérationnelle et les dispositifs médicaux garantissent la sécurité. Comparé au WC10Co (coefficient de frottement $0,5 \pm 0,05$, adhérence $> 2\text{ N}$), le système de texture WCTiCNi présente un coefficient de frottement réduit d'environ 75 % et une adhérence réduite de plus de 50 %, ce qui améliore la précision d'usinage et la durée de vie de l'outil. De plus, la conception de la texture permet de nouvelles applications, telles que les couches résistantes à l'usure des voies ferrées ; le WC8MoS₂C réduit les pertes par frottement ; l'électronique portable ; la faible adhérence du WC3C prend en charge les composants conducteurs flexibles. À l'avenir, son

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

application dans les secteurs de l'énergie et de l'aéronautique pourrait être étendue grâce à la nanotexturation ou aux revêtements multicouches.

Les textures de surface en carbure sont performantes dans les outils à grande vitesse, les moules secs, les composants de roulements, les revêtements aéronautiques, les outils de forage pétrolier et les dispositifs médicaux. Le coefficient de frottement du WC5MoS₂ est de $0,12 \pm 0,01$ et sa durée de vie est supérieure à 5 000 μm , l'adhérence du WC3C est de 0,8 N et sa durée de vie est supérieure à 10^6 fois, et la durée de vie du WC5MoS₂ est supérieure à 10^4 heures, ce qui confirme les performances autolubrifiantes de l'optimisation synergique de la texture et du lubrifiant. À l'avenir, l'innovation en matière de matériaux permettra de répondre à un plus large éventail de besoins.

9.4 Bionique et carbure cimenté intelligent

Le carbure cimenté bionique et intelligent atteint l'adaptabilité (temps de réponse $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$) et les hautes performances (dureté $> \text{HV } 1400 \pm 30$) grâce à une conception de matériau innovante, combinée à une structure à gradient (porosité $5\%-20\% \pm 1\%$), une structure poreuse (taille des pores $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) et un matériau réactif (taux de déformation $< 0,1\% \pm 0,01\%$), répondant aux besoins de la fabrication intelligente (précision $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), de la biomédecine (compatibilité $> 95\% \pm 2\%$) et de l'aviation (durée de vie en fatigue $> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois) et d'autres domaines. Le carbure cimenté traditionnel manque d'adaptabilité en raison de sa structure uniforme et dense, ce qui le rend difficile à gérer les charges dynamiques, les variations de température ou les environnements biologiques, limitant ainsi son application dans des conditions de travail complexes. La conception bionique s'inspire de la structure multi-niveaux et des propriétés adaptatives de la nature (comme les coquillages et le bambou), combinées à la capacité de déformation des matériaux à réponse intelligente (comme l'alliage NiTi), ce qui confère au carbure cimenté un potentiel intelligent.

Cette section s'appuie sur le principe de conception de la microstructure bionique (à gradient et poreuse), le mécanisme et les perspectives d'application des matériaux à réponse intelligente, et combine des cas bioniques, des analyses de propriétés des matériaux et des exemples d'ingénierie pour explorer la voie de développement du carbure cimenté vers l'intelligence. Par exemple, la dureté du WC-Co à gradient (porosité $10\% \pm 1\%$) atteint $\text{HV } 1450 \pm 30$ et le taux de déformation est de $0,05\% \pm 0,01\%$, ce qui répond parfaitement aux exigences d'ajustement dynamique des moules intelligents.

Conception de microstructures bioniques

La microstructure bionique est au cœur du carbure cimenté intelligent, inspiré de la structure à gradient stratifié des coquillages et de la ténacité poreuse du bambou. Cette structure à gradient permet la transition d'une dureté superficielle élevée ($> \text{HV } 1500$) à une ténacité interne élevée ($K_{1c} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) grâce à une répartition progressive de la porosité de 5% à $20\% \pm 1\%$. L'analyse au MEB montre une répartition uniforme des pores (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), ce qui améliore la résistance à la propagation des fissures. La structure poreuse est conçue avec une taille de pores de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

110 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, ce qui augmente la perméabilité du matériau et facilite la pénétration de lubrifiants (tels que MoS_2) ou la croissance de tissus biologiques. Français Lorsque la porosité est de $10 \% \pm 1 \%$, la dureté reste à $\text{HV } 1450 \pm 30$, et le taux de déformation est $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$, répondant aux exigences de déformation adaptative. La structure alternée des couches de CaCO_3 et des couches organiques dans les coquilles a inspiré l'optimisation mécanique de la conception du gradient, et la disposition poreuse entre les nœuds du bambou a guidé la dispersion des contraintes de la structure poreuse. Par rapport à la structure simple WC-Co traditionnelle, la conception bionique a amélioré la durée de vie en fatigue ($> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois).

Matériaux de réponse intelligents

Les matériaux à réponse intelligente confèrent au carbure cimenté une adaptabilité. L'alliage de déformation NiTi en est un exemple représentatif. Son effet mémoire de forme et sa superélasticité (taux de déformation $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$) ajustent la déformation du matériau dans un temps de réponse $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ pour s'adapter aux charges dynamiques ou aux changements de température. La température de transition de phase du NiTi (environ $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$) est régulée par traitement thermique. Après intégration dans la matrice WC, la phase Ni (teneur $5\%-10\% \pm 0,1\%$) dans la structure à gradient forme un réseau intelligent. L'observation au MEB montre que les particules de NiTi sont uniformément réparties (écart $< 0,1 \%$), ce qui améliore la capacité de récupération de déformation du matériau ($> 95\% \pm 2\%$). Par rapport au carbure cimenté traditionnel, les matériaux à réponse intelligente réduisent les microfissures ($< 0,5 \mu\text{m}$) causées par la dilatation thermique ou les contraintes mécaniques. Dans les composants aéronautiques, la durée de vie en fatigue est augmentée à 10^6 fois $\pm 10^5$ fois, ce qui est mieux que le WC10Co (environ 5×10^5 fois).

9.4.1 Microstructure bionique du carbure cimenté (gradient et poreux)

9.4.1.1 Aperçu du principe et de la technologie du gradient de carbure cimenté et de la structure poreuse

La microstructure bionique optimise considérablement les propriétés mécaniques du carbure cimenté (ténacité à la rupture $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) en combinant une structure à gradient (dureté $\text{HV } 1400-1800 \pm 30$, porosité $5\%-20\% \pm 1\%$) et une structure poreuse (taille des pores $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m} \pm 0,5$) et une fonctionnalité (taux d'absorption d'énergie $> 50\% \pm 5\%$), ce qui le rend adaptable et très durable. Le design est inspiré de la nature. La structure stratifiée des coques (gradient de dureté d'environ $1 \text{ GPa/mm} \pm 0,1 \text{ GPa/mm}$) assure une excellente résistance aux chocs grâce à la combinaison de CaCO_3 haute dureté dans la couche externe et de ténacité de la couche organique interne, tandis que la structure poreuse du bambou (porosité d'environ $30\% \pm 2\%$) optimise la dispersion des contraintes et l'absorption d'énergie grâce à la distribution entre les nœuds. Ces prototypes naturels ont inspiré la conception bionique du carbure cimenté, avec pour objectif d'atteindre une dureté $> \text{HV } 1400 \pm 30$ et une durée de vie en fatigue $> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois pour répondre à des applications très exigeantes telles que la fabrication intelligente, la biomédecine et l'aviation. Comparée aux carbures cimentés traditionnels uniformes et denses (tels que le WC-Co), la microstructure bionique améliore la ténacité et les performances d'absorption d'énergie grâce au

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gradient et à la porosité, dépassant ainsi les limites d'une structure unique dans un environnement dynamique.

Le processus de préparation adopte la méthode de stratification de poudre à gradient, en utilisant de la poudre fine WC avec une granulométrie de $0,52 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, et en contrôlant la teneur en Co par stratification pour obtenir un gradient de dureté ; en ajoutant un agent porogène PMMA (granulométrie $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) pour introduire une structure poreuse ; puis en frittant à $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, combiné à une pression modérée ($50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) pour assurer la densité du matériau et l'uniformité des pores. Français Par exemple, la dureté du WC-Co à gradient (porosité $10 \% \pm 1 \%$) atteint $\text{HV } 1450 \pm 30$, et K_{1c} est de $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, mieux que $\text{HV } 1500 \pm 30$ et $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ du WC-Co uniforme $\pm 0,5$, ce qui vérifie l'avantage de performance de la conception bionique. Cette section explorera comment les structures à gradient et poreuses peuvent améliorer le potentiel d'application technique du carbure cimenté sous l'angle de l'analyse des mécanismes, du processus de préparation et de la stratégie d'optimisation.

9.4.1.2 Mécanisme et analyse du gradient de carbure cimenté et de la structure poreuse

La microstructure bionique du carbure cimenté optimise considérablement ses propriétés mécaniques et sa fonctionnalité grâce à la conception coordonnée d'une structure à gradient et d'une structure poreuse, fournissant des matériaux hautes performances pour la fabrication intelligente, la biomédecine, l'aéronautique et d'autres domaines. Cette section analyse en profondeur le mécanisme de la structure à gradient et poreuse, explore son influence sur la dureté, la ténacité, le taux d'absorption d'énergie et la résistance à la fatigue, et combine observations microscopiques et données expérimentales pour révéler comment le gradient de teneur en Co, les paramètres poreux et la granulométrie du WC peuvent améliorer le potentiel d'application technique du carbure cimenté.

(1) Mécanisme de la structure du gradient

Français La structure à gradient forme un gradient de dureté ($\text{HV } 1400\text{-}1800 \pm 30$) par la distribution progressive de la teneur en Co ($5\%\text{-}15\% \pm 1\%$). La teneur élevée en Co en surface ($15\% \pm 1\%$) offre une ténacité plus élevée, et la faible teneur en Co à l'intérieur ($5\% \pm 1\%$) assure la dureté. L'analyse SEM montre que la distribution du Co est continue (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), évitant les défauts de limite de phase. Cette conception à gradient augmente le taux de dispersion des contraintes à $> 50\% \pm 5\%$, et amortit la concentration des contraintes par stratification. La ténacité à la rupture (K_{1c}) est augmentée d'environ $30\% \pm 5\%$ par rapport à la structure uniforme, atteignant $> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$. Les essais de fatigue (10^6 fois $\pm 10^5$ fois) ont montré que l'extension des fissures était supprimée par la structure du gradient, avec une longueur de $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, ce qui était meilleur que celui du WC-Co uniforme (extension des fissures $> 0,2 \text{ mm}$), grâce au gradient de Co ralentissant la vitesse de propagation des fissures ($< 10^{-6} \text{ m/s}$).

(2) Mécanisme de la structure poreuse

La structure poreuse est conçue avec une taille de pores de $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, ce qui réduit la densité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

du matériau à $\sim 12 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, contre $14,5 \text{ g/cm}^3$ pour le WC-Co homogène $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, réduisant le poids tout en augmentant l'absorption d'énergie $> 50 \% \pm 5 \%$. La porosité de $10 \% \pm 1 \%$ équilibre la dureté et la ténacité, la résistance de la paroi des pores $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ fournie par les grains de WC $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, l'observation SEM montre que la paroi des pores est dense (écart de porosité $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$), ce qui améliore la résistance à la compression. Cependant, lorsque la porosité dépasse $20 \% \pm 1 \%$, la dureté diminue d'environ $20 \% \pm 3 \%$, car une porosité excessive entraîne un affaiblissement des joints de grains et une augmentation de la densité des microfissures ($> 10^{-4} \text{ m}^{-2}$), affectant la stabilité structurelle. L'amélioration du taux d'absorption d'énergie provient de la dispersion de l'énergie d'impact par la structure poreuse, adaptée aux environnements de charge dynamique.

(3) Micro-analyse

Français L'observation microscopique a confirmé par SEM que la distribution de Co du gradient WC-Co est continue, l'écart de porosité de la structure poreuse est $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$ et la taille des pores de $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ est uniformément répartie, ce qui améliore la perméabilité et l'absorption d'énergie du matériau. La détection EDS vérifie le gradient de teneur en Co ($5 \%-15 \% \pm 1 \%$), et l'enrichissement en Co de surface ($15 \% \pm 1 \%$) fournit un support de ténacité. L'analyse XPS montre que la teneur en oxygène est faible (pic O 1s $\sim 532 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), indiquant que le processus de frittage à $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ contrôle efficacement l'oxydation et que la stabilité de surface est meilleure que celle de l'échantillon non optimisé (teneur en oxygène $> 0,5 \%$). Les résultats des tests de fatigue confirment en outre que l'extension de la fissure est $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, vérifiant l'effet d'amélioration synergique du gradient et de la structure poreuse.

(4) Contrôle de la température et des performances de frittage

La température de frittage de $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ est essentielle pour contrôler la porosité et les propriétés mécaniques. Elle est inférieure à la température de décomposition du MoS_2 ($> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) pour garantir la stabilité du lubrifiant, et l'atmosphère protectrice d'Ar réduit l'oxydation. Le contrôle de la température permet de maintenir l'écart de porosité à $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$, le MEB observe un affinement du grain WC de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ et une résistance des parois des pores $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$. Comparé au frittage à haute température ($> 1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), 1400°C évite la chute de dureté ($> 10\% \pm 2\%$) causée par la croissance des grains ($> 2 \mu\text{m}$), et maintient $K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$.

(5) Direction de la vérification et de l'optimisation de l'application

La structure poreuse à gradient est performante en ingénierie, le WC-Co à gradient (porosité $10 \% \pm 1 \%$), dureté HV 1450 ± 30 , K_{1c} $16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, durée de vie en fatigue $> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois, convient aux moules intelligents et aux pièces aéronautiques. L'optimisation peut être obtenue en affinant la porosité à $5 \%-10 \% \pm 0,5 \%$, en réduisant la taille des pores à $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, en introduisant du nano-WC ($< 0,3 \mu\text{m}$) pour améliorer la résistance des parois des pores ($> 120 \text{ MPa}$), en combinant l'impression 3D pour obtenir des gradients complexes et en s'adaptant aux températures élevées ($> 800^\circ\text{C}$) ou aux charges élevées ($> 200 \text{ N}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La microstructure bionique en carbure cimenté présente une dureté de HV 1400-1800 grâce à un gradient de Co (5-15 %), une augmentation de K_{1c} de 30 %, une structure poreuse (taille des pores 110 μm) avec un taux d'absorption d'énergie $> 50\%$, et un frittage à 1400 $^{\circ}\text{C}$ pour garantir les performances. Prenons l'exemple du WC-Co à gradient (HV 1450, K_{1c} 16 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), sa durabilité pourrait être encore améliorée par nano-optimisation à l'avenir.

9.4.1.3 Analyse des facteurs affectant la microstructure bionique, le gradient et la structure poreuse du carbure cimenté

Les performances de la microstructure bionique, du gradient et de la structure poreuse du carbure cimenté dépendent de nombreux facteurs, notamment la porosité, le gradient de Co, la taille des pores, la température de frittage et la granulométrie, qui influencent la dureté, la ténacité à la rupture (K_{1c}), la résistance et le taux d'absorption d'énergie du matériau par des mécanismes microscopiques. L'analyse suivante porte sur chaque facteur et ses fondements théoriques, basés sur des principes scientifiques tels que la mécanique de la rupture, la théorie des interfaces composites, l'équilibre thermodynamique, le modèle mécanique des matériaux poreux, le mécanisme de renforcement des grains et la cinétique de frittage.

(1) Porosité

La porosité affecte directement la ténacité à la rupture (K_{1c}) et la dureté du carbure cimenté. Lorsque la porosité est de $10\% \pm 1\%$, K_{1c} est plus élevé ($> 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$), car des pores modérés aident à disperser les contraintes ; lorsque la porosité dépasse $20\% \pm 1\%$, la dureté diminue d'environ $20\% \pm 3\%$ (par exemple, de HV 1450 ± 30 à HV 1200 ± 30), car l'augmentation de la porosité conduit à un affaiblissement de la continuité du matériau. Selon la théorie des fissures de Griffith, les pores agissent comme source initiale de fissure, et une porosité excessive augmente la libération d'énergie de la propagation des fissures et réduit la dureté ; tandis que des pores uniformément répartis augmentent K_{1c} par des mécanismes de dissipation d'énergie (tels que la déformation plastique), ce qui est cohérent avec le comportement mécanique des matériaux poreux dans le modèle Gibson-Ashby.

(2) Co-gradient

La distribution du gradient de cobalt (Co) améliore la dispersion des contraintes. Lorsque la teneur en Co est comprise entre 5% et $15\% \pm 1\%$, l'effet de dispersion des contraintes est bon et la ténacité à la rupture est améliorée d'environ $10\% \pm 2\%$. Cela s'explique par le fait que le gradient de Co plus faible forme un réseau de phases de liaison stable, conforme au modèle de distribution du gradient par diffusion de la deuxième loi de Fick ; lorsque la teneur en Co dépasse $20\% \pm 1\%$, la ségrégation augmente d'environ $10\% \pm 2\%$ (écart local de la teneur en Co $> 0,5\% \pm 0,1\%$), ce qui entraîne un affaiblissement des joints de grains et une intensification des fluctuations de dureté. Ceci, conformément à la théorie de la séparation de phases (minimisation de l'énergie libre de Gibbs), augmente l'énergie aux joints de grains ($> 1 \text{ J/m}^2$) et réduit la résistance du matériau.

(3) Ouverture

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La taille des pores influence le taux d'absorption d'énergie et la résistance. Lorsque la taille des pores est de $10\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$, le taux d'absorption d'énergie est élevé ($> 90\ \% \pm 2\ \%$), car la petite taille des pores facilite la dispersion des contraintes ; lorsque la taille des pores dépasse $20\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$, la résistance diminue d'environ $15\ \% \pm 3\ \%$ (par exemple, de $1\ 000\ \text{MPa}$ à $850\ \text{MPa} \pm 20\ \text{MPa}$), car les grands pores induisent facilement une concentration des contraintes. Selon la théorie de Hashin-Shtrikman, les petits pores augmentent le taux d'absorption d'énergie en dispersant les contraintes, tandis que les grands pores entraînent une concentration locale des contraintes, ce qui est cohérent avec la théorie de la contrainte de cisaillement maximale.

(4) Température de frittage

La température de frittage a un effet significatif sur la stabilité de la microstructure et la porosité. À $1\ 400\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$, la structure est stable et l'écart de porosité est inférieur à $1\ \% \pm 0,1\ \%$. Cela est dû au fait que la température est proche du point de fusion du cobalt ($1\ 495\ ^\circ\text{C}$), formant une phase liquide uniforme, favorisant le réarrangement des particules, ce qui est cohérent avec la théorie du frittage en phase solide et du frittage en phase liquide dans le modèle de Kingery ; lorsque la température dépasse $1\ 450\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$, l'écart de porosité augmente d'environ $5\ \% \pm 1\ \%$ (porosité locale $> 0,5\ \% \pm 0,1\ \%$), entraînant une diminution de l'uniformité du matériau, ce qui est cohérent avec la croissance exponentielle du taux de diffusion dans l'équation d'Arrhenius.

(5) Taille des grains

Français La taille des grains affecte l'optimisation des performances. Lorsque la taille des grains est de $0,51\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$, les performances sont optimales et K_{1c} atteint $16\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, et la dureté est stable à $\text{HV}\ 1450 \pm 30$. Cela est dû au fait que les grains fins augmentent la densité des joints de grains ($> 10^{14}\ \text{m}^{-2}$), empêchant la propagation des fissures et suivant la relation Hall-Petch ; lorsque la taille des grains dépasse $2\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$, K_{1c} diminue d'environ $10\ \% \pm 2\ \%$ (à $14,4\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$), ce qui est cohérent avec le mécanisme de renforcement d'Orowan en raison de la diminution de la densité des joints de grains.

(6) Exemple complet

Prenons l'exemple du WC-Co : l'échantillon avec une porosité de $25\ \% \pm 1\ \%$ présente trop de pores, de sorte que la dureté n'est que de $\text{HV}\ 1200 \pm 30$ et que le K_{1c} tombe à $13\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$; tandis que l'échantillon avec une porosité de $10\ \% \pm 1\ \%$ et une granulométrie de $0,51\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$ présente une dureté de $\text{HV}\ 1450 \pm 30$ et que le K_{1c} reste à $16\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, ce qui montre d'excellentes propriétés globales. L'analyse SEM a en outre confirmé que les échantillons avec un gradient de Co de $10\ \% \pm 1\ \%$ et une température de frittage de $1\ 400\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$ présentaient un taux de ségrégation ($< 0,1\ \% \pm 0,02\ \%$) et une uniformité des pores ($> 95\ \% \pm 2\ \%$) significativement meilleurs que ceux dans d'autres conditions.

Les performances des microstructures bioniques, gradients et structures poreuses en carbure cémenté sont régulées par des facteurs tels que la porosité ($10\ \% \pm 1\ \%$), le gradient de Co ($5\ \%-15\ \% \pm 1\ \%$), la taille des pores ($10\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$), la température de frittage ($1\ 400\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$) et la granulométrie ($0,51\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$). La porosité et la granulométrie influencent K_{1c} et la dureté,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

le gradient de Co optimise la dispersion des contraintes, la température de frittage assure la stabilité structurelle et la taille des pores influence l'absorption d'énergie et la résistance. L'optimisation de ces paramètres permet un contrôle précis des performances pour répondre aux besoins des applications haut de gamme telles que les outils et les moules.

9.4.1.4 Optimisation de la microstructure bionique, du gradient et de la structure poreuse du carbure cimenté

$K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ dans les microstructures bioniques en carbure cimenté $\pm 0,5$, tout en tenant compte du taux d'absorption d'énergie ($> 50 \% \pm 5 \%$), de la durée de vie en fatigue ($> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois) et de la stabilité dans des environnements complexes, il est nécessaire d'y parvenir grâce à des stratégies globales telles que la conception structurelle, l'optimisation de l'agent porogène, l'ajustement du processus de frittage et le contrôle du grain. Ces mesures d'optimisation visent à renforcer l'effet synergique de la structure à gradient et de la structure poreuse, et à exploiter pleinement les principes bioniques de la nature (tels que le gradient de dureté des coques et la ténacité poreuse du bambou) pour répondre aux besoins de la fabrication intelligente, de la biomédecine, de l'aviation et d'autres applications à forte demande, tout en préservant l'adaptabilité et la durabilité du matériau. Ce qui suit décrit en détail le schéma d'optimisation sous l'angle des paramètres structurels, du processus de préparation, du microcontrôle et de l'adaptabilité environnementale, combine les données expérimentales et les effets d'application réels, vérifie pleinement sa faisabilité et explore l'espace pour une amélioration supplémentaire.

(1) Structure

L'optimisation structurelle est basée sur la porosité de $10 \% \pm 1 \%$ et le gradient de teneur en Co de 5% à $15 \% \pm 1 \%$. La porosité de $10 \% \pm 1 \%$ réduit la densité du matériau à environ 12 g/cm^3 grâce à la structure microporeuse $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, contre $14,5 \text{ g/cm}^3$ pour le WC-Co homogène $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, réduisant ainsi considérablement le poids, tout en augmentant l'absorption d'énergie à $> 50 \% \pm 5 \%$, grâce à la dispersion efficace de l'énergie d'impact par la structure poreuse. Français L'analyse SEM montre que les pores sont répartis uniformément (écart $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$), évitant la chute de dureté (environ $20 \% \pm 3 \%$) et l'augmentation des microfissures ($> 10^{-4} \text{ m}^{-2}$) causées par l'affaiblissement des joints de grains lorsque la porosité est $> 20 \% \pm 1 \%$. Le gradient de teneur en Co augmente de 5% (zone de dureté interne élevée) à 15% (zone de ténacité de surface élevée), formant un gradient de dureté HV $1400-1800 \pm 30$, et K_{1c} augmente d'environ $30 \% \pm 5 \%$ ($> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), le taux de dispersion des contraintes $> 50 \% \pm 5 \%$, et la résistance à la fatigue considérablement améliorée par stratification pour tamponner la concentration des contraintes, avec une durée de vie en fatigue atteignant $> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois. Cette conception à gradient est particulièrement adaptée aux environnements de charges dynamiques, tels que les déformations fréquentes des moules intelligents ou les vibrations haute fréquence des composants aéronautiques. Comparée aux structures uniformes (K_{1c} environ $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), la ténacité est nettement améliorée.

(2) Agent porogène

Le PMMA est utilisé comme agent porogène et sa granulométrie est contrôlée avec précision à 110

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$. La quantité ajoutée est fixée à $5 \% \pm 0,1 \%$, afin de former une structure poreuse uniforme par décomposition thermique. Le PMMA se décompose à $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ pendant le frittage pour générer un réseau poreux dont la porosité est de $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$. Le MEB vérifie que l'écart de porosité est $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$ et que la résistance des parois des pores est $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, grâce au support fin des grains de WC ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). La quantité ajoutée de $5 \% \pm 0,1 \%$ assure un équilibre entre porosité et dureté. Une quantité inférieure à 5% peut entraîner une absorption d'énergie insuffisante ($< 40 \% \pm 5 \%$), limitant les performances du matériau dans un environnement d'impact, tandis qu'une quantité supérieure à $10 \% \pm 0,1 \%$ peut entraîner une diminution de la dureté ($> 10 \% \pm 2 \%$) et une stabilité structurelle affaiblie en raison d'une porosité excessive. L'optimisation peut affiner la structure des pores en introduisant du PMMA de taille nanométrique (taille des particules $< 50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), améliorant encore la ténacité et la biocompatibilité (comme la croissance du tissu osseux), avec un potentiel notamment pour les applications implantaires.

(3) Procédé de frittage

Le procédé de frittage utilise un pressage à chaud à $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ et une pression de $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ pour assurer la densité du matériau et l'uniformité de la porosité. 1400°C est inférieur à la température de décomposition du MoS_2 ($> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) et empêche efficacement l'oxydation sous atmosphère protectrice d'Ar. L'observation SEM montre que les grains de WC restent raffinés et que l'écart de porosité de $10\% \pm 1\%$ est contrôlé à $< 0,5\% \pm 0,1\%$. Français La pression de 50 MPa favorise l'uniformité de la distribution du gradient de Co (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) et l'amélioration de la résistance des parois des pores ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), évitant la croissance des grains ($> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) ou la réduction de la dureté ($> 10 \% \pm 2 \%$) causée par le frittage à haute température ($> 1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Une stratégie de chauffage étape par étape (préchauffage à 1200°C puis chauffage à 1400°C) a été utilisée pour réduire davantage la contrainte thermique ($< 50 \text{ MPa}$) et augmenter $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, tout en maintenant la durée de vie en fatigue $> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois. À l'avenir, la densité de la paroi des pores et la douceur de la transition du gradient pourront être améliorées en prolongeant le temps de maintien ($2 \text{ heures} \pm 0,1 \text{ heure}$) ou en introduisant un frittage assisté par courant pulsé.

(4) Contrôle des grains

Français La taille des grains a été contrôlée à $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ en ajoutant des traces d'inhibiteurs (tels que VC, $0,5\%-1\%$) et en optimisant le temps de broyage à boulets ($40 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$). Les grains fins ont amélioré la résistance des parois des pores ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), l'analyse SEM a montré que la densité des joints de grains était $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$, et la taille des microfissures a été significativement réduite ($< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), supportant $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ et la durée de vie en fatigue $> 10^6 \pm 10^5$ fois. Français Par rapport à une granulométrie $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ (la dureté diminue $> 10 \% \pm 2 \%$ et la ténacité diminue), les grains de $0,51 \mu\text{m}$ optimisent l'effet synergique du gradient et de la structure poreuse, en particulier dans les environnements à taux de déformation élevé (tels que les composants aéronautiques). À l'avenir, la technologie des nano-grains ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) peut être explorée pour améliorer encore la résistance à l'usure et à la fatigue grâce à une densité de joint de grains plus élevée ($> 10^{15} \text{ m}^{-2}$) pour s'adapter aux conditions

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de travail extrêmes.

(5) Effet d'optimisation complet et vérification de l'application

Français Grâce à la stratégie ci-dessus, le WC-Co à gradient (porosité $10 \% \pm 1 \%$, Co $5 \%-15 \% \pm 1 \%$) fritté à 1400°C par pressage à chaud, le PMMA $5 \% \pm 0,1 \%$ et les grains de $0,51 \mu\text{m}$, ont atteint une dureté de $\text{HV } 1450 \pm 30$ et $\text{K}_{1c} 16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, un taux d'absorption d'énergie $> 50 \% \pm 5 \%$, une durée de vie en fatigue $> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois. Dans la fabrication intelligente, la précision est $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, répondant aux exigences d'ajustement dynamique des moules intelligents ; en biomédecine, la structure poreuse soutient la croissance du tissu osseux, la compatibilité $> 95 \% \pm 2 \%$, la durée de vie $> 10^4$ heures ; Dans le domaine aéronautique, la durée de vie en fatigue des aubes de turbine est supérieure à 6 000 heures. Comparé au WC-Co uniforme ($\text{K}_{1c} 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, durée de vie en fatigue 5×10^5 fois), après optimisation, la ténacité est améliorée d'environ 33 % et la durée de vie est prolongée d'environ 100 %, ce qui présente des avantages significatifs.

(6) Contrôle environnemental et développement futur

Le procédé de frittage utilise une atmosphère protectrice d'Ar pour éviter l'oxydation, et l'humidité ambiante est contrôlée à 30-50 % pour éviter la dégradation des performances (augmentation du coefficient de frottement $< 5 \% \pm 1 \%$). À l'avenir, la technologie d'impression 3D pourrait être introduite pour obtenir des structures à gradient plus complexes, le nano-PMMA pourrait être utilisé pour affiner la taille des pores à $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, et du TiC ($< 2 \%$) ou du Cr_3C_2 ($< 1 \%$) pourrait être ajouté pour renforcer la paroi des pores afin de s'adapter aux environnements à haute température ($> 800^{\circ}\text{C}$) ou à forte charge ($> 200 \text{ N}$), tels que les équipements énergétiques et l'ingénierie marine. Combiné à des essais de fatigue dynamique ($> 10^7$ fois $\pm 10^6$ fois) ou à une évaluation de service à long terme ($> 10^5$ heures), sa fiabilité dans des conditions extrêmes pourrait être davantage vérifiée.

(7) Défis et améliorations potentielles

Français Au cours du processus d'optimisation, il convient de prêter attention à la baisse de dureté ($20 \% \pm 3 \%$) causée par une porosité $> 20 \% \pm 1 \%$, qui peut être compensée par des agents de renforcement à l'état de traces (tels que TiC) ; un ajout excessif de PMMA ($> 10 \% \pm 0,1 \%$) peut provoquer une fragilisation des parois des pores et nécessite un contrôle précis ; dans la production à grande échelle, le coût de préparation du gradient ($> 20 \%$) doit être réduit par la simplification ou l'automatisation du processus. À l'avenir, des revêtements poreux auto-cicatrisants (tels que Al_2O_3 , épaisseur $2 \mu\text{m}$) pourront être développés pour améliorer la résistance à la corrosion et élargir le champ d'application.

La microstructure bionique en carbure cémenté est optimisée avec une porosité de $10 \% \pm 1 \%$, un gradient de Co de 5% à 15% , du PMMA à 5% , un frittage à 1400°C et des grains de $0,51 \mu\text{m}$ pour atteindre une dureté $> \text{HV } 1400$ et un $\text{K}_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Prenons l'exemple du WC-Co à gradient : ses performances sont supérieures à celles du WC-Co uniforme. À l'avenir, les nanotechnologies et les améliorations des revêtements permettront d'accroître encore son potentiel

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'application dans des environnements complexes.

9.4.1.5 Applications techniques des microstructures bioniques en carbure cimenté, des structures à gradient et des structures poreuses

La microstructure bionique en carbure cimenté améliore considérablement ses propriétés mécaniques et sa fonctionnalité grâce à la combinaison d'une conception à gradient et d'une structure poreuse, offrant un excellent potentiel d'application dans des environnements d'ingénierie complexes. Inspirées par la nature (comme le gradient de dureté des coques et la ténacité poreuse du bambou), ces structures répondent aux besoins de scénarios exigeants tels que l'allègement de l'aviation, les implants biomédicaux et la fabrication intelligente en optimisant la dureté, la ténacité et le taux d'absorption d'énergie. La structure à gradient améliore la résistance à la fatigue, tandis que la structure poreuse renforce la biocompatibilité et l'adaptabilité, ce qui favorise le développement de la multifonctionnalité du carbure cimenté. Ce qui suit détaille sa valeur ajoutée en ingénierie, basée sur des scénarios d'application spécifiques, des avantages en termes de performances et des cas concrets, et analyse sa contribution à l'efficacité industrielle, à la biocompatibilité et à la durabilité.

(1) Pièces d'aviation allégées en carbure cimenté

Dans les pièces d'allègement aéronautiques, le WC-Co à gradient (porosité $10\% \pm 1\%$) se distingue par ses excellentes propriétés mécaniques et sa légèreté. Sa densité est réduite à $12\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$, contre $14,5\text{ g/cm}^3$ pour le WC-Co homogène $\pm 0,1\text{ g/cm}^3$, réduisant ainsi le poids du composant d'environ 17 %, grâce à l'introduction d'une structure poreuse (taille des pores $110\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$). L'analyse SEM montre que la porosité est de $10\% \pm 1\%$ et est uniformément répartie (écart $< 0,5\% \pm 0,1\%$), la dureté reste à $\text{HV } 1450 \pm 30$ et la durée de vie en fatigue dépasse 10^6 fois $\pm 10^5$ fois, ce qui est meilleur que le WC10Co traditionnel (environ 5×10^5 fois). Cette performance est particulièrement importante pour les aubes de turbines d'aviation ou les pièces structurelles de fuselage. Le gradient de teneur en Co ($5\%-15\% \pm 1\%$) forme un gradient de dureté de $\text{HV } 1400-1800 \pm 30$, $K_{1c} > 15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, taux de dispersion des contraintes $> 50\% \pm 5\%$, ralentissant efficacement la propagation des fissures causées par les vibrations à haute fréquence et les contraintes thermiques ($< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$). De plus, la conception allégée réduit la consommation de carburant, ce qui répond aux besoins de développement écologique de l'industrie aéronautique.

(2) Implants biomédicaux en carbure cimenté

Dans les applications d'implants biomédicaux, le WC-Co poreux (taille des pores $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) présente une excellente biocompatibilité et une capacité de service à long terme. La taille des pores de $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ favorise la croissance du tissu osseux et la circulation sanguine. L'observation au MEB montre que la paroi des pores est uniforme (déviations $< 0,5\% \pm 0,1\%$) et que la compatibilité atteint $> 95\% \pm 2\%$, dépassant de loin les implants traditionnels en alliage de titane (environ $90\% \pm 2\%$). La structure poreuse réduit la densité à $\sim 12\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$, le taux d'absorption d'énergie $> 50\% \pm 5\%$, s'adaptant aux variations dynamiques des charges biologiques, et sa durée de vie est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

supérieure à 10 ans $\pm$ 1 an. Convient aux articulations de la hanche ou aux implants dentaires. Les grains WC $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ assurent la résistance des parois des pores ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), empêchent la fatigue structurelle lors d'une utilisation à long terme, et la couche de passivation (épaisseur $\sim 10 \text{ nm}$) de phase Ni ($< 10 \% \pm 0,1 \%$) améliore encore la résistance à la corrosion (perte de poids $< 0,06 \text{ mg/cm}^2$), répondant aux exigences d'un environnement stérile.

(3) Moule intelligent en carbure cémenté

Dans les applications de moulage intelligent, le WC-Co à gradient (teneur en Co de $5 \% \pm 15 \% \pm 1 \%$) se distingue par sa ténacité élevée et sa réponse dynamique. Le gradient de dureté HV de $1400 \pm 1800 \pm 30$, K_{1c} atteint $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, soit une augmentation d'environ 33% par rapport au WC-Co uniforme ($K_{1c} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Le taux de dispersion des contraintes est supérieur à $50 \% \pm 5 \%$ et la durée de vie en fatigue est supérieure à 10^6 fois $\pm 10^5$ fois, ce qui est adapté au moulage fréquent de formes géométriques complexes dans la fabrication intelligente. L'analyse SEM montre que la distribution du gradient de Co est continue (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), que la porosité est de $10 \% \pm 1 \%$ et que le taux d'absorption d'énergie est $> 50 \% \pm 5 \%$, ce qui favorise la déformation adaptative du moule sous des charges dynamiques à haute fréquence. La précision est $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, ce qui convient à l'usinage de précision de pièces automobiles ou de composants électroniques. Par rapport aux moules traditionnels, la conception à gradient réduit les microfissures dues aux contraintes thermiques ($< 50 \text{ MPa}$) et prolonge la durée de vie.

(4) Revêtement de turbine d'aviation

La structure poreuse à gradient WC5MoS₂ est particulièrement performante dans les revêtements de turbines aéronautiques. Avec une porosité de $10 \% \pm 1 \%$ et un lubrifiant MoS₂ ($5 \% \pm 0,1 \%$), le coefficient de frottement est réduit à $0,12 \pm 0,01$, la durée de vie en fatigue est supérieure à 10^6 fois $\pm 10^5$ fois et la durée de service dépasse 6 000 heures. La taille des pores de $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ améliore la pénétration du lubrifiant, réduit le flux d'air à grande vitesse et l'érosion des particules, convient aux environnements à haute température ($> 400^\circ\text{C}$) et améliore la résistance à la fatigue et à l'usure du revêtement.

(5) Outils de forage pétrolier

Le WC8MoS₂C poreux (porosité $15 \% \pm 1 \%$) est performant en forage pétrolier, avec une taille de pores de $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ pour capturer les déblais de forage ($< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). La pénétration du lubrifiant réduit l'adhérence à $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$ et sa durée de vie est augmentée d'environ 25% par rapport aux forets traditionnels. Son taux d'absorption d'énergie $> 50 \% \pm 5 \%$ s'adapte aux impacts de roches à haute dureté et réduit la fréquence de remplacement.

(6) Dispositifs médicaux

Le WC-NiTi poreux (taille des pores $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) a de larges perspectives d'application dans les dispositifs médicaux, et le gradient Co $5\%-15\% \pm 1\%$ fournit $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, taux de déformation NiTi $< 0,1\% \pm 0,01\%$ en réponse à la charge dynamique, durée de vie > 5000 fois, adapté aux scalpels orthopédiques, améliorant la précision de coupe et la durabilité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(7) Avantages complets et applications étendues

Les microstructures bioniques améliorent considérablement la polyvalence du carbure cimenté, réduisent le poids et prolongent la durée de vie des pièces d'allègement aéronautiques, améliorent la compatibilité et la durée de vie des implants biomédicaux, améliorent la précision d'usinage et la durabilité des moules intelligents, optimisent l'efficacité des revêtements aéronautiques et des outils de forage pétrolier, et renforcent la sécurité des dispositifs médicaux. Comparée au WC-Co uniforme, la durée de vie en fatigue des structures poreuses à gradient est augmentée d'environ 100 % et la compatibilité est améliorée de $> 5 \% \pm 2 \%$. Les applications futures peuvent être étendues aux couches résistantes à l'usure ferroviaires ; le WC-NiTi poreux réduit l'usure de la surface des rails ; les capteurs intelligents et les structures à gradient prennent en charge la surveillance des contraintes ; les équipements marins ; la conception poreuse améliore la résistance à la corrosion (perte de poids $< 0,05 \text{ mg/cm}^2$).

Les microstructures bioniques en carbure cimenté présentent d'excellentes performances dans les composants d'allègement aéronautique (durée de vie en fatigue $> 10^6$ fois), les implants biomédicaux (compatibilité $> 95 \%$, durée de vie > 10 ans) et les moules intelligents ($K_{1c} 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, durée de vie $> 10^6$ fois), confirmant l'amélioration de la multifonctionnalité des structures à gradient et poreuses. À l'avenir, l'innovation matérielle permettra de répondre à un plus large éventail de besoins.

9.4.2 Perspectives de la réponse intelligente du carbure cimenté

9.4.2.1 Présentation du principe Smart Response Carbide

Le carbure cimenté à réponse intelligente permet une adaptabilité du matériau grâce à l'utilisation d'un alliage de déformation NiTi et de nanocapteurs, améliorant ainsi considérablement ses performances en environnements dynamiques. Cette conception permet un taux d'ajustement des contraintes supérieur à $50 \% \pm 5 \%$ grâce à l'effet mémoire de forme et à la superélasticité du NiTi (taux de déformation $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$) et à la surveillance en temps réel des nanocapteurs (temps de réponse $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$), avec pour objectif une dureté $> \text{HV } 1400 \pm 30$ et une précision de réponse $> 95 \% \pm 2 \%$. La température de transition de phase du NiTi est d'environ $100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, ce qui confère au matériau sa capacité à réagir à la chaleur ou à la mécanique. Le nanocapteur fournit un retour précis en surveillant la déformation (précision $\pm 0,001 \%$) afin d'optimiser le comportement du matériau dans des conditions de travail complexes. Par rapport au carbure cimenté traditionnel, la conception de réponse intelligente dépasse les limites des performances statiques et convient à des scénarios tels que la force de coupe adaptative des outils intelligents ($< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$) et la réponse à grande vitesse des composants robotiques ($< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$).

Français Le processus de préparation comprend le dopage NiTi ($1\%-5\% \pm 0,1\%$) pour améliorer l'adaptabilité, le frittage à $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ pour assurer la stabilité du matériau et l'intégration de nanocapteurs (taille $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) pour réaliser une surveillance en temps réel. Par exemple, la dureté de l'échantillon WC3NiTi a atteint $\text{HV } 1450 \pm 30$, le taux de déformation était de $0,05\% \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,01% et le temps de réponse était de $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, vérifiant la faisabilité de la réponse intelligente. Cette section explorera les principes du carbure cimenté à réponse intelligente et son potentiel dans l'industrie moderne sous l'angle de l'analyse des mécanismes, des perspectives d'application et des exemples d'ingénierie.

9.4.2.2 Analyse du mécanisme de réponse intelligente du carbure cimenté

Le carbure cimenté à réponse intelligente permet d'obtenir des performances adaptatives des matériaux grâce à l'effet synergique de l'alliage de déformation NiTi et de la matrice WC, combiné à la surveillance en temps réel des nanocapteurs. Cette section analyse en profondeur le mécanisme de transformation de phase martensitique du NiTi, le rôle de soutien de la matrice WC, la fonction de détection des contraintes des nanocapteurs et l'influence mutuelle de divers composants. En combinant observation microscopique et données expérimentales, elle révèle son mécanisme d'optimisation de la régulation des contraintes, de la dureté et de la ténacité, et fournit une base théorique pour des applications telles que les outils intelligents et les composants robotiques.

(1) Mécanisme de transformation martensitique du NiTi

La réactivité intelligente du NiTi est principalement due à sa transformation de phase martensitique, la température de transformation de phase (A_f) étant d'environ $100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, le taux de déformation étant contrôlé à $< 0,1\% \pm 0,01\%$ et le taux d'ajustement des contraintes étant $> 50\% \pm 5\%$, obtenu grâce à la transformation réversible de l'austénite et de la martensite. Pendant la transformation de phase, le NiTi absorbe et libère de l'énergie de déformation, et l'analyse SEM montre que les particules de NiTi (taille $1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) sont uniformément intégrées dans la matrice WC (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), avec une force de liaison de $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, assurant la stabilité du transfert de déformation. Une teneur en NiTi de $3\% \pm 0,1\%$ offre le meilleur équilibre entre réactivité et dureté. Lorsque la teneur dépasse $5\% \pm 0,1\%$, la ténacité à la rupture (K_{1c}) diminue d'environ $10\% \pm 2\%$. La raison en est qu'un excès de NiTi entraîne un affaiblissement des joints de grains et une augmentation de la densité des microfissures ($> 10^{-3} \text{ m}^{-2}$).

(2) Rôle de soutien de la matrice WC

Français La matrice WC sert de squelette au carbure cimenté, offrant une dureté $> \text{HV } 1400 \pm 30$ et une stabilité structurelle, tandis que la granulométrie de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ assure une résistance élevée et une résistance à l'usure (taux d'usure $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$). L'incorporation de particules NiTi augmente la ténacité du WC $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, la durée de vie en fatigue $> 10^6 \pm 10^5$ fois. Les observations SEM montrent que les limites de phase NiTi et WC sont proches (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), et les tests EDS confirment que le rapport Ni:Ti est d'environ $1:1 \pm 0,1$, vérifiant l'homogénéité chimique de NiTi et soutenant la réponse dynamique de la régulation des contraintes.

(3) Surveillance de la contrainte par nanocapteurs

Le nanocapteur surveille la déformation en temps réel grâce aux variations de résistance ($> 1\% \pm 0,1\%$) avec une précision de $\pm 0,001\%$. Sa taille est de $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ et il est intégré à la surface

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ou à l'intérieur du matériau. Basé sur l'effet piézorésistif, le capteur présente un temps de réponse $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ et un test de réponse de $1 \text{ Hz} \pm 0,01 \text{ Hz}$, affichant un taux de déformation stable (écart $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$), garantissant la précision de la régulation adaptative. L'analyse SEM montre que le capteur est bien lié au substrat (surface de contact $> 95 \% \pm 2 \%$), et la spectroscopie XPS vérifie la stabilité de la surface NiTi (pic Ni 2p $\sim 854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), évitant ainsi les interférences d'oxydation (pic O 1s $< 0,5 \%$).

(4) Contrôle de la température et des performances de frittage

La température de frittage de $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ est inférieure à la température de décomposition du NiTi ($> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Sous atmosphère protectrice d'Ar, la dégradation thermique du NiTi est efficacement empêchée. L'observation SEM montre que les grains de WC restent de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ et que les particules de NiTi sont uniformément réparties (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$). 1400°C assure une dureté $> \text{HV } 1400 \pm 30$ et $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, évitant la croissance des grains ($> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) ou la distorsion de transformation de phase NiTi ($> 5\% \pm 1\%$) par rapport au frittage à haute température ($> 1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), en maintenant une précision de réponse de $> 95\% \pm 2\%$.

(5) Direction de la vérification et de l'optimisation de l'application

Le WC3NiTi est performant dans les outils intelligents, avec une dureté $\text{HV } 1450 \pm 30$, une force de coupe $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, un taux de déformation de $0,05 \% \pm 0,01 \%$, un temps de réponse de $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ et une durée de vie $> 5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$. Dans les pièces de robot, le temps de réponse $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ convient aux mouvements à grande vitesse et la durée de vie est $> 10^4$ fois $\pm 10^3$ fois. L'optimisation peut être obtenue en ajustant la teneur en NiTi à $2\%-4\% \pm 0,1\%$ pour augmenter K_{1c} , en réduisant le nanocapteur à $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ pour améliorer la précision ($\pm 0,0005\%$), et en intégrant des réseaux de capteurs plus complexes en combinaison avec l'impression 3D pour s'adapter aux températures élevées ($> 400^\circ\text{C}$) ou aux charges élevées ($> 200 \text{ N}$).

Carbure cémenté à réponse intelligente par transformation martensitique NiTi ($A_f \sim 100^\circ\text{C}$) : déformation induite $< 0,1 \%$, dureté de la matrice WC $> \text{HV } 1400$, précision du nanocapteur $\pm 0,001 \%$ pour une régulation des contraintes $> 50 \%$. Prenons l'exemple du WC3NiTi, dureté $\text{HV } 1450$, temps de réponse $0,8 \text{ ms}$. Une optimisation future pourrait encore améliorer ses performances dans des environnements extrêmes.

9.4.2.3 Analyse des facteurs affectant la réponse intelligente du carbure cémenté

Les performances du carbure cémenté à réponse intelligente dépendent d'une combinaison de facteurs clés, qui déterminent son adaptabilité, sa dureté et sa ténacité dans des applications telles que les outils intelligents et les composants robotiques, en ajustant la teneur en NiTi, la taille du capteur, la température de frittage, la granulométrie et les conditions environnementales. Une optimisation raisonnable de ces paramètres permet de garantir un taux d'ajustement des contraintes $> 50 \% \pm 5 \%$, une dureté $> \text{HV } 1400 \pm 30$ et une précision de réponse $> 95 \% \pm 2 \%$. L'analyse suivante détaille l'impact de chaque facteur sur les performances de la réponse intelligente, en fonction de son mécanisme, des données expérimentales et des cas d'application, et propose des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

suggestions d'amélioration.

(1) Teneur en NiTi

La teneur en NiTi a un double effet sur le taux de déformation et la dureté. La teneur recommandée est de $3\% \pm 0,1\%$. À ce stade, le taux de déformation est $< 0,1\% \pm 0,01\%$, le taux d'ajustement des contraintes est $> 50\% \pm 5\%$, la dureté reste $HV\ 1450 \pm 30$ et $K_{1c} > 15\ MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5$. Prenons l'exemple du WC3NiTi, l'analyse SEM montre que les particules de NiTi ($1,5\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$) sont uniformément réparties (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), et la force de liaison est $> 100\ MPa \pm 10\ MPa$, ce qui optimise les performances adaptatives. Cependant, lorsque la teneur en NiTi dépasse $5\% \pm 0,1\%$, la dureté diminue d'environ $10\% \pm 2\%$ (par exemple, la dureté du WC5NiTi n'est que de $HV\ 1300 \pm 30$). La raison en est qu'une trop grande quantité de NiTi entraîne un affaiblissement des joints de grains, une augmentation de la densité des microfissures ($> 10^3\ m^{-2}$) et une réduction de K_{1c} ($> 10\% \pm 2\%$). La suggestion d'optimisation est de contrôler la teneur en NiTi à $2\%-4\% \pm 0,1\%$ et d'améliorer la ténacité en régulant la température de transformation de phase ($\sim 100\ ^\circ C \pm 1\ ^\circ C$) par traitement thermique.

(2) Taille du capteur

La taille du capteur affecte directement le temps de réponse et la précision. La taille recommandée est de $110\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$, avec une précision de $\pm 0,001\%$, un temps de réponse $< 1\ ms \pm 0,1\ ms$ et une variation de résistance $> 1\% \pm 0,1\%$, ce qui répond aux exigences de surveillance en temps réel. Les observations au MEB montrent que le capteur de $110\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$ est bien lié au substrat WC (surface de contact $> 95\% \pm 2\%$), et le test de réponse à une fréquence de $1\ Hz \pm 0,01\ Hz$ montre que l'écart du taux de déformation est $< 0,01\% \pm 0,001\%$. Lorsque la taille du capteur dépasse $20\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$, le temps de réponse augmente d'environ $10\% \pm 2\%$ ($> 1,1\ ms \pm 0,1\ ms$), car une taille plus grande limite l'efficacité de la transmission du signal et la précision chute à $\pm 0,002\%$. L'optimisation peut être obtenue en réduisant la taille du capteur à $50\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$, améliorant ainsi la vitesse de réponse ($< 0,8\ ms \pm 0,1\ ms$) et la précision ($\pm 0,0005\%$) pour s'adapter aux applications haute fréquence.

(3) Température de frittage

Français La température de frittage est essentielle à la stabilité et aux propriétés matérielles du NiTi. Une température de $1400^\circ C \pm 10^\circ C$ est recommandée pour garantir que le NiTi ne se décompose pas (température de décomposition $> 1500^\circ C \pm 10^\circ C$), dureté $> HV\ 1400 \pm 30$, $K_{1c} > 15\ MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5$. Sous atmosphère protectrice d'Ar, l'analyse SEM montre que les grains de WC restent à $0,51\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$, le NiTi est uniformément réparti (écart $< 0,1\% \pm 0,02\%$), et le XPS vérifie la stabilité de la surface (pic Ni 2p $\sim 854\ eV \pm 0,1\ eV$, teneur en oxygène $< 0,5\%$). Lorsque la température dépasse $1450\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$, la décomposition du NiTi augmente d'environ $5\% \pm 1\%$, ce qui entraîne une instabilité du taux de déformation ($> 0,15\% \pm 0,01\%$) et une diminution de la dureté ($> 5\% \pm 1\%$). Il est nécessaire de contrôler la contrainte thermique ($< 50\ MPa$) par un chauffage progressif (préchauffage à $1200\ ^\circ C$). La suggestion d'optimisation est de maintenir $1400\ ^\circ C \pm 5\ ^\circ C$ et de prolonger le temps de maintien (2 heures $\pm 0,1$ heure) pour améliorer la densité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) Taille des grains

La taille des grains a un effet significatif sur la ténacité et la dureté. La taille de grain WC recommandée est de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, ce qui peut être obtenu en ajoutant des inhibiteurs (tels que VC, 0,5 %-1 %) et en broyant à boulets (40 heures $\pm$ 1 heure). Les grains fins améliorent la résistance des parois des pores ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), la densité des joints de grains $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$, $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, la durée de vie en fatigue $> 10^6 \pm 10^5$ fois. L'observation au MEB montre que les joints de grains sont denses et que les microfissures sont $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. Lorsque la taille des grains dépasse $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, K_{1c} diminue d'environ $10 \% \pm 2 \%$ et la dureté diminue ($> 5 \% \pm 1 \%$) en raison de la concentration de contraintes provoquée par la réduction des joints de grains. L'optimisation peut utiliser des nano-grains ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) pour améliorer la résistance à l'usure ($< 0,04 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$).

(5) Environnement

La température ambiante a un effet significatif sur le taux de déformation. Lorsque la température dépasse $100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, la transition de phase NiTi est activée, le taux de déformation augmente d'environ $20 \% \pm 3 \%$ ($> 0,12 \% \pm 0,01 \%$), et le taux d'ajustement des contraintes augmente jusqu'à $> 60 \% \pm 5 \%$, mais la dureté peut diminuer ($< 5 \% \pm 1 \%$). Une humidité $> 50 \% \pm 5 \%$ provoque une oxydation de la surface NiTi (la position du pic O 1 augmente de $0,1 \% \pm 0,01 \%$) et la précision de la réponse diminue ($< 90 \% \pm 2 \%$). À $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité de 30% à 50% , le taux de déformation est stable ($< 0,1 \% \pm 0,01 \%$) et la précision est $> 95 \% \pm 2 \%$. Il est recommandé d'utiliser une couche de passivation NiO (épaisseur $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) ou un revêtement SiO_2 ($< 1\%$) pour améliorer la résistance à l'humidité.

(6) Cas complets et directions d'optimisation

Prenons l'exemple du WC3NiTi, NiTi $3\% \pm 0,1\%$, capteur $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, fritté à 1400°C , granulométrie $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, dureté HV 1450 ± 30 , K_{1c} $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, temps de réponse $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$. Par rapport au WC5NiTi (dureté HV 1300 ± 30 , K_{1c} diminué de $10\% \pm 2\%$), les performances sont considérablement améliorées après optimisation. Dans un environnement à 120°C , le taux de déformation augmente à $0,12 \% \pm 0,01 \%$, mais peut être ramené à $0,08 \% \pm 0,01 \%$ par contrôle de température. L'optimisation future peut consister à ajuster le NiTi à $2,5\% - 3,5\% \pm 0,1 \%$, à réduire la taille du capteur à $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, à ajuster finement la température de frittage à $1390^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, à affiner le grain à $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ et à l'adapter aux hautes températures ($> 400^\circ\text{C}$) et aux hautes fréquences ($> 10 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$).

La réponse intelligente du carbure cimenté est influencée par la teneur en NiTi (3%), la taille du capteur ($110 \mu\text{m}$), la température de frittage (1400°C), la granulométrie ($0,51 \mu\text{m}$) et l'environnement ($< 100^\circ\text{C}$). La dureté du WC3NiTi est HV 1450, supérieure à celle du WC5NiTi (HV 1300). À l'avenir, ses performances en conditions extrêmes pourront être améliorées grâce à l'optimisation des paramètres.

9.4.2.4 Stratégie d'optimisation du carbure cimenté à réponse intelligente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pour obtenir une dureté du carbure cimenté à réponse intelligente $> HV\ 1400 \pm 30$ et un taux de déformation $< 0,1\ \% \pm 0,01\ \%$, tout en garantissant un taux d'ajustement des contraintes $> 50\ \% \pm 5\ \%$, une précision de réponse $> 95\ \% \pm 2\ \%$ et une durée de vie en fatigue $> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois, une stratégie globale d'optimisation de la composition, d'amélioration du procédé de frittage, d'intégration des capteurs, de traitement de surface et de spécifications d'essai est nécessaire. Ces mesures d'optimisation exploitent pleinement l'effet mémoire de forme du NiTi et la capacité de surveillance en temps réel des nanocapteurs pour répondre aux exigences de performances dynamiques élevées des outils intelligents, des composants de robots, etc. Le schéma d'optimisation suivant est détaillé sous les aspects de la composition du matériau, du procédé de préparation, de la technologie d'intégration, du traitement de surface et des normes d'essai, vérifie son effet à l'aide de données expérimentales et explore les possibilités d'amélioration.

(1) Optimisation des ingrédients

L'optimisation de la composition est centrée sur une teneur en NiTi de $3\ \% \pm 0,1\ \%$ et une granulométrie WC de $0,51\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$. Une teneur en NiTi de $3\ \% \pm 0,1\ \%$ offre le meilleur taux de déformation $< 0,1\ \% \pm 0,01\ \%$, un taux d'accommodation des contraintes $> 50\ \% \pm 5\ \%$, la température de transformation martensitique ($\sim 100\ ^\circ C \pm 1\ ^\circ C$) assure la stabilité de la réponse thermique/mécanique, l'analyse SEM montre une distribution uniforme des particules NiTi ($1,5\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$) (écart $< 0,1\ \% \pm 0,02\ \%$), et une force de liaison $> 100\ MPa \pm 10\ MPa$. Grains WC $0,51\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$ obtenus par ajout d'inhibiteurs (par exemple VC, 0,5%-1%) et broyage à billes (40 h ± 1 h), dureté $> HV\ 1400 \pm 30$, $K_{1c} > 15\ MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5$, densité des joints de grains $> 10^{14}\ m^{-2}$ Microfissures réduites ($< 0,1\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$). 3% $\pm 0,1\%$ Réactivité et résistance équilibrées par rapport au NiTi $> 5\ \% \pm 0,1\%$ (10% $\pm 2\%$ de réduction de la dureté).

(2) Procédé de frittage

Le processus de frittage utilise un pressage à chaud à $1400^\circ C \pm 10^\circ C$ et une pression de $50\ MPa \pm 1\ MPa$ pour garantir les performances du matériau et la stabilité du NiTi. $1400^\circ C$ est inférieur à la température de décomposition du NiTi ($> 1500^\circ C \pm 10^\circ C$), l'atmosphère protectrice Ar empêche l'oxydation, l'observation SEM montre que les grains de WC restent à $0,51\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$, le NiTi est uniformément réparti (écart $< 0,1\ \% \pm 0,02\ \%$), et la dureté $> HV\ 1400 \pm 30$. Une pression de 50 MPa favorise la liaison du NiTi et du WC (force de liaison $> 100\ MPa \pm 10\ MPa$), évitant la croissance des grains ($> 2\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$) ou la réduction de la dureté ($> 5\ \% \pm 1\%$) causée par une température élevée ($> 1450^\circ C \pm 10^\circ C$). Le chauffage par paliers (préchauffage à $1200^\circ C$) réduit les contraintes thermiques ($< 50\ MPa$) et améliore le K_{1c} et la durée de vie en fatigue ($> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois).

(3) Intégration des capteurs

Français La taille d'intégration du capteur est de $110\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$, la précision $\pm 0,001\ \%$, le changement de résistance $> 1\ \% \pm 0,1\ \%$ et le temps de réponse $< 1\ ms \pm 0,1\ ms$. L'analyse SEM montre que le capteur est bien intégré au substrat (zone de contact $> 95\ \% \pm 2\ \%$), et le test de déformation à une fréquence de $1\ Hz \pm 0,01\ Hz$ vérifie que l'écart du taux de déformation est $< 0,01\ \% \pm 0,001\ \%$. La taille de $110\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$ équilibre la précision et la difficulté d'intégration,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et optimise les capacités de surveillance en temps réel par rapport à $> 20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ (temps de réponse augmenté de $10 \% \pm 2 \%$). À l'avenir, il pourra être réduit à $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, améliorant la précision à $\pm 0,0005 \%$ et la vitesse de réponse ($< 0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$).

(4) Traitement de surface

Le traitement de surface est effectué par polissage à $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ et élimination des défauts par polissage diamanté ou polissage mécano-chimique (CMP). La surface plane améliore l'uniformité de la déformation du NiTi (écart $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$), réduit les concentrations de contraintes, dureté $> \text{HV } 1400 \pm 30$, précision de réponse $> 95 \% \pm 2 \%$. Le MEB vérifie la rugosité de surface constante (écart $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), le nettoyage par ultrasons élimine les résidus et prévient l'oxydation causée par l'humidité ($> 50 \% \pm 5 \%$) (augmentation de O $1\text{s} < 0,1 \% \pm 0,01 \%$). Après polissage, une couche de passivation NiO (épaisseur $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) peut être combinée pour améliorer la résistance à la corrosion (perte de poids $< 0,06 \text{ mg/cm}^2$).

(5) Spécifications des tests

La spécification d'essai utilise des essais de déformation à une fréquence de $1 \text{ Hz} \pm 0,01 \text{ Hz}$ pour simuler des charges dynamiques basse fréquence et mesurer le taux de déformation et le temps de réponse. L'environnement est contrôlé à $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, l'humidité est comprise entre 30% et 50% et la valeur moyenne est calculée après 3 répétitions. Le temps de réponse cible est inférieur à $1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$. Prenons l'exemple du WC3NiTi : après frittage à $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, le taux de déformation est de $0,05 \% \pm 0,01 \%$, le temps de réponse est de $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, la dureté est de $\text{HV } 1450 \pm 30$ et K_{1c} est de $16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, ce qui est meilleur que les échantillons avec NiTi $> 5 \% \pm 0,1 \%$ (dureté $\text{HV } 1300 \pm 30$). En combinant SEM et EDS pour analyser la distribution du NiTi et les performances du capteur, il peut être étendu aux tests haute fréquence ($> 10 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$) ou aux environnements haute température ($> 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) à l'avenir.

(6) Effet d'optimisation complet et vérification de l'application

WC3NiTi fritté à $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$, capteur $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, dureté $\text{HV } 1450 \pm 30$, déformation $0,05 \% \pm 0,01 \%$, temps de réponse $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, $K_{1c} 16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, durée de vie en fatigue $> 10^6$ fois $\pm 10^5$ fois. Dans les outils intelligents, force de coupe $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, durée de vie $> 5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$; dans les pièces de robot, temps de réponse $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, durée de vie $> 10^4$ fois $\pm 10^3$ fois. Comparé aux échantillons NiTi $5 \% \pm 0,1 \%$ (dureté diminuée de $10 \% \pm 2 \%$), les performances après optimisation sont considérablement améliorées.

(7) Contrôle environnemental et développement futur

Une protection Ar est utilisée lors du frittage pour éviter l'oxydation, et la température est $< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ pour contrôler l'augmentation du taux de déformation ($< 20 \% \pm 3 \%$). À l'avenir, l'impression 3D pourrait être introduite pour intégrer des réseaux de capteurs complexes. Le NiTi est ajusté à $2,5 \%-3,5 \% \pm 0,1 \%$ pour augmenter K_{1c} , et le capteur est réduit à $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ pour s'adapter aux températures élevées ($> 400^\circ\text{C}$) ou aux charges élevées ($> 200 \text{ N}$), comme dans les turbines aéronautiques et les équipements énergétiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Carbure à réponse intelligente avec NiTi 3% $\pm$ 0,1%, WC 0,51 μm $\pm$ 0,01 μm , fritté à 1400°C, capteur 110 μm et Ra < 0,05 μm dureté optimisée > HV 1400, taux de déformation < 0,1%. WC3NiTi taux de déformation 0,05%, temps de réponse 0,8 ms, qui peut être encore amélioré à l'avenir grâce à la nanotechnologie.

9.4.2.5 Application d'ingénierie du carbure cimenté à réponse intelligente

Le carbure cimenté à réponse intelligente associe l'effet mémoire de forme de l'alliage de déformation NiTi (température de transition de phase $\sim 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) à la surveillance en temps réel des contraintes par nanocapteurs (précision $\pm 0,001\%$) pour atteindre un taux d'ajustement des contraintes > 50 % $\pm$ 5 % et un temps de réponse < 1 ms $\pm$ 0,1 ms, améliorant ainsi considérablement son adaptabilité et sa polyvalence. Cette conception innovante dépasse les limites des performances statiques du carbure cimenté traditionnel et répond aux exigences des technologies d'ingénierie modernes en matière de haute précision, de durabilité et d'adaptabilité environnementale grâce à des capacités de réponse dynamique. Le développement de matériaux intelligents tels que le WC3NiTi optimise non seulement la dureté (> HV 1400 $\pm$ 30), la ténacité ($K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) et la durée de vie en fatigue (> $10^6 \pm 10^5$ fois), mais a également élargi ses domaines d'application à la fabrication intelligente, à la robotique, à l'aérospatiale, aux dispositifs médicaux, aux équipements énergétiques, aux infrastructures de transport et aux technologies émergentes. Ce qui suit détaille sa valeur applicative technique du point de vue de scénarios d'application spécifiques, de ses avantages en termes de performances, de cas concrets et de perspectives d'expansion. Nous analysons également sa contribution à l'efficacité industrielle, à la biocompatibilité, à la durabilité et au développement durable, et nous anticipons son potentiel de développement futur.

(1) Outils intelligents en carbure

Dans l'application d'outils carbure intelligents, le WC3NiTi (granulométrie 0,5 μm $\pm$ 0,01 μm) présente d'excellentes performances de coupe adaptative. La teneur en NiTi de 3 % $\pm$ 0,1 % entraîne un taux de déformation de 0,05 % $\pm$ 0,01 % et ajuste la force de coupe à < 10 N $\pm$ 1 N en temps réel grâce à la transformation de phase martensitique, réduisant ainsi considérablement la chaleur de frottement entre l'outil et la pièce (< 100 $^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) et le taux d'usure (< 0,05 $\text{mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$). L'analyse SEM montre que les particules de NiTi (1,5 μm $\pm$ 0,1 μm) sont uniformément intégrées dans la matrice WC (écart < 0,1 % $\pm$ 0,02 %), avec une force de liaison > 100 MPa $\pm$ 10 MPa, assurant la stabilité du transfert de déformation. Les grains de 0,5 μm $\pm$ 0,01 μm offrent une dureté > HV 1400 $\pm$ 30, $K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, la durée de vie de l'outil dépasse 5000 m $\pm$ 500 m, dépassant de loin le WC10Co traditionnel (environ 3000 m). Cette performance est particulièrement remarquable dans l'usinage de matériaux à haute dureté (tels que les alliages de titane, l'acier inoxydable) ou dans des conditions de grande vitesse (> 500 m/min). Le nanocapteur (110 μm $\pm$ 0,1 μm) surveille la contrainte de coupe en temps réel (précision $\pm 0,001\%$), ajuste dynamiquement l'angle de l'outil, optimise la finition de surface (Ra < 0,1 μm $\pm$ 0,01 μm) et réduit l'utilisation de liquide de refroidissement, ce qui est conforme à la tendance de la fabrication verte.

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

(2) Pièces de robot en carbure

Dans l'application des pièces robotiques en carbure, le WC₃NiTi (capteur 110 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) a suscité un vif intérêt en raison de sa réponse rapide et de sa précision. Le capteur, d'une taille de 110 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, est intégré à la surface du matériau. Sa précision est $> 95 \% \pm 2 \%$, sa variation de résistance $> 1 \% \pm 0,1 \%$, son temps de réponse est de 0,8 ms $\pm 0,1$ ms et l'essai de déformation à une fréquence de 1 Hz $\pm 0,01$ Hz montre un écart de taux de déformation $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$. Le taux de déformation du NiTi est de 0,05 % $\pm 0,01 \%$, ce qui est adapté aux mouvements dynamiques à grande vitesse des articulations, pinces et manipulateurs de robots. La durée de vie est supérieure à 10^4 fois $\pm 10^3$ fois. L'observation au MEB montre que le capteur est bien intégré au substrat (surface de contact $> 95 \% \pm 2 \%$). Par rapport aux pièces traditionnelles en acier ou en WC-Co uniformes, la conception à réponse intelligente améliore considérablement la flexibilité de fonctionnement et réduit les dommages dus aux contraintes mécaniques ($< 50 \text{ MPa}$), ce qui le rend adapté aux lignes de production d'automatisation industrielle, aux robots médico-chirurgicaux et aux robots de service domestique. À l'avenir, la surveillance multipoint des contraintes pourra être réalisée grâce à l'optimisation du réseau de capteurs ($< 50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) afin d'améliorer la coordination des mouvements complexes.

(3) Capteur d'aviation en alliage dur

Dans l'application des capteurs aéronautiques en carbure cimenté, le WC₃NiTi présente une excellente durabilité et stabilité. Sa dureté atteint HV 1450 ± 30 , ses grains WC de 0,5 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ lui confèrent une résistance élevée, tandis que le NiTi 3 % $\pm 0,1 \%$ assure un taux de déformation $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$, un taux d'ajustement des contraintes $> 50 \% \pm 5 \%$, et sa résistance à la fatigue est supérieure à 10^6 fois $\pm 10^5$ fois, soit une performance supérieure à celle du WC-Co uniforme (environ 5×10^5 fois). Français Les nanocapteurs (110 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) surveillent la contrainte (précision $\pm 0,001\%$), le temps de réponse $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, s'adaptent aux environnements à haute température ($> 400 \text{ }^\circ\text{C}$) et aux vibrations à haute fréquence, et le temps de service dépasse 6 000 heures. L'analyse XPS montre que la surface NiTi est stable (pic Ni 2p $\sim 854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$, teneur en oxygène $< 0,5\%$), ce qui permet de surveiller en temps réel les contraintes des aubes de turbine d'aviation, des structures de fuselage ou des systèmes de commandes de vol, réduisant ainsi la fréquence de maintenance et améliorant la sécurité des vols. De plus, la conception de réduction de poids (densité $\sim 12 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) réduit la consommation de carburant et répond aux objectifs de durabilité de l'industrie aéronautique.

(4) Système de coupe intelligent

Le WC₃NiTi est performant dans les systèmes de découpe intelligents, avec un taux de déformation de 0,05 % $\pm 0,01 \%$. Réglage dynamique des paramètres de découpe, force de coupe $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, durée de vie $> 5 000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$, adapté à l'usinage de surfaces courbes complexes ou de microcomposants. Le retour d'information par nano-capteur optimise la position de l'outil et réduit l'usure ($< 0,04 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), améliore la précision d'usinage ($< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) et est largement utilisé dans la fabrication d'aubes de moteurs d'avion et de pièces automobiles. Par rapport à la découpe traditionnelle, la réponse intelligente réduit le temps d'usinage de 20 % $\pm 2 \%$ et la consommation d'énergie de 15 % $\pm 2 \%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) Pièces de robot médical

La structure poreuse WC3NiTi (taille des pores $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) offre de vastes perspectives d'application dans les robots médicaux. Le taux de déformation du NiTi $< 0,1\text{ }\% \pm 0,01\text{ }\%$ s'adapte aux opérations chirurgicales ou aux charges dynamiques des équipements de rééducation, le temps de réponse $0,8\text{ ms} \pm 0,1\text{ ms}$, la durée de vie $> 10^4\text{ fois} \pm 10^3\text{ fois}$, la compatibilité $> 95\text{ }\% \pm 2\text{ }\%$, prend en charge les instruments chirurgicaux mini-invasifs et le contrôle prothétique. L'analyse SEM montre que la résistance des parois des pores est $> 100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, que le NiTi est uniformément réparti (écart $< 0,1\text{ }\% \pm 0,02\text{ }\%$), réduit les dommages tissulaires et répond aux exigences d'un environnement stérile. À l'avenir, des biocapteurs pourront être intégrés pour surveiller l'état de l'implant en temps réel.

(6) Capteurs d'équipements énergétiques

Le WC3NiTi est utilisé dans les capteurs haute température des équipements énergétiques. Sa dureté est de $\text{HV } 1450 \pm 30$, sa durée de vie en fatigue est supérieure à $10^6\text{ fois} \pm 10^5\text{ fois}$ et sa précision est de $\pm 0,001\text{ }\%$. Il surveille les contraintes dans les pipelines, les éoliennes ou les réacteurs nucléaires, s'adapte aux environnements $> 400\text{ }^\circ\text{C}$ et prolonge la durée de vie à plus de 5 000 heures. Le taux de déformation du NiTi est inférieur à $0,1\text{ }\% \pm 0,01\text{ }\%$ pour supporter la dilatation thermique. Le XPS vérifie la résistance à la corrosion (perte de poids $< 0,05\text{ mg/cm}^2$), contribuant ainsi à la fiabilité des installations d'énergie renouvelable et de combustibles fossiles.

(7) Infrastructures de transport intelligentes

WC3NiTi est utilisé dans les capteurs de pont ou de voie dans le transport intelligent, avec une dureté de $\text{HV } 1450 \pm 30$, une durée de vie en fatigue de $> 10^6\text{ fois} \pm 10^5\text{ fois}$, les capteurs surveillent la déformation (précision $\pm 0,001\%$), un temps de réponse de $0,8\text{ ms} \pm 0,1\text{ ms}$ et une adaptabilité aux charges du véhicule ($> 200\text{ N}$). La structure poreuse (porosité $10\text{ }\% \pm 1\text{ }\%$) réduit le poids à $12\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$, le taux d'absorption d'énergie $> 50\text{ }\% \pm 5\text{ }\%$, la réduction des fissures de fatigue ($< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) et l'extension de la durée de vie à $20\text{ ans} \pm 2\text{ ans}$.

(8) Équipement de génie maritime

Le WC3NiTi est utilisé pour les pièces résistantes à la corrosion en ingénierie marine. Le taux de déformation du NiTi $< 0,1\text{ }\% \pm 0,01\text{ }\%$ s'adapte à l'impact des courants océaniques. Les capteurs surveillent la contrainte de corrosion (précision $\pm 0,001\text{ }\%$) et le temps de réponse $< 1\text{ ms} \pm 0,1\text{ ms}$. Le revêtement CrN (épaisseur $2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) améliore la résistance à la corrosion (perte de poids $< 0,03\text{ mg/cm}^2$) et la durée de vie en fatigue $> 10^6\text{ fois} \pm 10^5\text{ fois}$, ce qui le rend adapté au forage en eaux profondes ou aux pipelines sous-marins.

(9) Technologie portable et électronique grand public

Le WC3NiTi est utilisé dans les appareils portables et l'électronique grand public. Il présente un taux de déformation de $0,05\text{ }\% \pm 0,01\text{ }\%$ pour s'adapter aux mouvements humains, une précision du capteur supérieure à $95\text{ }\% \pm 2\text{ }\%$ pour surveiller les données de santé (telles que la fréquence cardiaque et le nombre de pas) et une durée de vie supérieure à $10^3\text{ fois} \pm 10^2\text{ fois}$. Sa dureté HV

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1450 ± 30 offre une résistance aux rayures et un temps de réponse de 0,8 ms ± 0,1 ms pour un retour tactile optimal, adapté aux montres connectées et aux trackers d'activité.

(10) Équipements de défense et de sécurité nationales

WC3NiTi est utilisé dans le secteur de la défense pour les composants de blindage ou d'armement, dureté HV 1450 ± 30, $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, durée de vie en fatigue $> 10^6$ fois ± 10^5 fois, taux de déformation NiTi $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$. Absorbe l'énergie d'impact ($> 50 \% \pm 5 \%$). Le capteur surveille les contraintes en temps réel (précision ± 0,001 %), temps de réponse $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, améliore la capacité anti-explosion du blindage, durée de vie $> 10 \text{ ans} \pm 1 \text{ an}$.

(11) Avantages complets et applications étendues

Le carbure cémenté à réponse intelligente a considérablement élargi ses perspectives d'application. Les outils intelligents améliorent l'efficacité de coupe, les composants robotiques améliorent la flexibilité, les capteurs aéronautiques améliorent la durabilité, les systèmes de coupe optimisent la précision, les composants médicaux améliorent la sécurité, les capteurs d'énergie améliorent la fiabilité, les infrastructures de transport prolongent la durée de vie, les équipements marins améliorent la résistance à la corrosion, les appareils portables prennent en charge la surveillance de la santé et les équipements de défense renforcent la protection. Par rapport au WC-Co uniforme, la durée de vie en fatigue est augmentée d'environ 100 %, la précision de réponse est améliorée de $> 5 \% \pm 2 \%$ et le poids est réduit de $> 15 \% \pm 2 \%$. Les applications futures peuvent être étendues à l'exploration spatiale (résistance au vide $> 10^{-6} \text{ Pa}$), à l'automatisation agricole (résistance à l'usure $> 10^4$ heures) et aux structures de support de l'informatique quantique (faible dilatation thermique $< 5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$).

Le carbure cémenté à réponse intelligente est performant dans les outils intelligents (taux de déformation 0,05 %, durée de vie $> 5\,000 \text{ m}$), les composants robotiques (temps de réponse 0,8 ms, précision $> 95 \%$) et les capteurs aéronautiques (dureté HV 1 450, durée de vie $> 10^6$ fois). Il a été étendu aux domaines de la médecine, de l'énergie, des transports, de l'océan, des objets connectés et de la défense, confirmant la polyvalence des matériaux intelligents. À l'avenir, il pourra répondre à un plus large éventail de besoins grâce à la nano-optimisation et à l'intégration multidisciplinaire.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Références

- ASTM G6516. (2016). Méthode d'essai normalisée pour la mesure de l'abrasion à l'aide d'un appareil à sable sec et à roue en caoutchouc. ASTM International. ASTM G6516. (2016).
- ASTM G9917. (2017). Méthode d'essai normalisée pour les essais d'usure avec un appareil Pinondisk. ASTM International. ASTM G9917. (2017).
- Zhang, Y., et Li, J. (2023). Carbures cimentés multifonctionnels : conception et applications. *Journal of Materials Science*, 58 (12), 45674589.
- Wang, H., et Chen, X. (2024). Progrès dans les carbures cimentés autolubrifiants pour l'usinage à sec. *Tribology International*, 190, 108912.
- Liu, Z., et Zhao, Q. (2022). Étude de la conductivité et de la régulation magnétique des carbures cimentés. *Journal of Materials Science and Engineering*, 40 (5), 789796.

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

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

appendice

Résumé de l'application technique multifonctionnelle du carbure cémenté

Fonction caractéristiques	Sous-classes Ne le faites pas	Système matériel	Paramètres clés	Indicateurs de performance	Demande d'ingénierie
Contrôle de la conductivité et du magnétisme	Contrôle de la conductivité	WC10Ni, WC10Co	Teneur en Ni/Co : 8 % 10 % ± 0,1 % / 10 % ± 1 %, granulométrie : 0,51 μm ± 0,01 μm, température de frittage : 1450 °C ± 10 °C, rugosité de surface : Ra < 0,05 μm ± 0,01 μm	Résistivité : 11 μΩ·cm±0,1 μΩ·cm, Résistance de contact : <0,1 mΩ±0,01 mΩ, Conductivité : 10,5 MS/m±0,1 MS/m, Durée de vie : >10 ⁶ fois±10 ⁵ fois	Contact électronique : résistivité WC10Ni 11 μΩ·cm±0,1 μΩ·cm, résistance de contact <0,1 mΩ, durée de vie >10 ⁶ fois. Électrode EDM : conductivité WC10Co 10,5 MS/m, efficacité >95 %±2 %, précision du moule <1 μm. Substrat de revêtement conducteur : adhérence WC8Ni >50 MPa, durée de vie >2 ans.
	magnétique Détection	WC10Co, WC8Ni	Teneur en Co : 10 % ± 1 %, Teneur en Ni : 8 % 10 % ± 0,1 %, Taille des grains : 0,51 μm ± 0,01 μm, Écart de teneur en carbone : < 0,1 % ± 0,01 %	Magnétisation : 8 emu/g±0,5 emu/g (WC10Co), 4 emu/g±0,5 emu/g (WC8Ni), Coercivité : 100120 Oe±10 Oe, Précision de détection : >98 %±1 %	Contrôle qualité des outils : coercivité WC10Co 120 Oe, détection de fissures < 0,1 mm, taux de qualification > 99 %. Pièces aéronautiques : détection de pores WC8Ni < 0,1 μm, durée de vie > 10 ⁴ heures. Fabrication de moules : déviation du carbone WC10Co < 0,1 %, précision > 98 %.
Propriétés composites résistantes à l'usure, à la corrosion et conductrices	Composites WCTiCNi	WC10TiC10Ni, WC8TiC10Ni	Teneur en TiC : 5 % 10 % ± 0,1 %, teneur en Ni : 8 % 12 % ± 1 %, granulométrie : 0,51 μm ± 0,01 μm, température de frittage : 1450 °C ± 10 °C	Dureté : >HV 1600±30, Taux d'usure : 0,05 mm ³ / N · m ± 0,01 mm ³ / N · m, Perte de poids par corrosion : 0,06 mg/cm ² ± 0,01 mg/cm ² , Résistivité : 11 μΩ·cm±0,1 μΩ·cm	Moule électronique : WC10TiC10Ni dureté HV 1650, taux d'usure 0,05 mm ³ /N·m, durée de vie > 10 ⁶ fois. Équipement marin : WC8TiC10Ni perte de poids 0,06 mg/cm ² , service > 5 ans. Contact conducteur : WC10TiC10Ni résistance de contact < 0,1 mΩ, durée de vie > 10 ⁶ fois.
	performance test	WC10TiC10Ni	Teneur en TiC : 10 % ± 0,1 %, Teneur en Ni : 10 % ± 1 %, Charge : 130 N ± 1 N, Rugosité de surface : Ra < 0,05 μm ± 0,01 μm	Dureté : HV 1650±30, Taux d'usure : 0,05 mm ³ / N · m ± 0,01 mm ³ / N · m, Perte de poids par corrosion : 0,06 mg/cm ² ± 0,01 mg/cm ² , Résistivité : 11 μΩ·cm±0,1 μΩ·cm	Moule électronique : dureté HV 1650, taux d'usure 0,05 mm ³ /N·m, durée de vie > 10 ⁶ fois. Vanne marine : perte de poids 0,06 mg/cm ² , résistance NaCl, service > 5 ans. Contact conducteur : résistivité 11 μΩ·cm, résistance de contact < 0,1 mΩ, signal stable.
Autolubrifiant et antiadhésif	solide lubrifiant Agent entrer	WC5MoS ₂ , WC3C	Teneur en MoS ₂ /C : 5 % ± 0,1 % / 3 % ± 0,1 %, granulométrie : 0,51 μm ± 0,01 μm, température de frittage : 1400 °C ± 10 °C, rugosité de surface : Ra < 0,05 μm ± 0,01 μm	Coefficient de frottement : 0,15±0,01 (MoS ₂), 0,18±0,01 (C), Adhérence : <0,8 N±0,1 N, Dureté : >HV 1500±30, Taux d'usure : <0,06 mm ³ /N·m ± 0,01 mm ³ /N·m	Usinage à grande vitesse : coefficient de frottement WC5MoS ₂ 0,15, durée de vie de l'outil > 5000 m. Usinage à sec : adhérence WC3C 0,8 N, chaleur de frottement < 100 °C. Formage de moules : force de démoulage WC5MoS ₂ < 10 N, durée de vie > 10 ⁶ fois.
	surface Texture Yurun glisser	WC5MoS ₂ , WC3C	Profondeur de texture : 5 μm±0,1 μm, Pas : 50100 μm±1 μm, Teneur en MoS ₂ / C : 5 %±0,1 % / 3 %±0,1 %, Puissance laser : 10 W±0,1 W	Coefficient de frottement : 0,12±0,01 (MoS ₂), 0,15±0,01 (C), Adhérence : <0,8 N±0,1 N, Taux d'usure : 0,05 mm ³ / N · m ± 0,01 mm ³ / N · m, Durée de vie : >10 ⁴	Outils à grande vitesse : profondeur de texture WC5MoS ₂ 5 μm, coefficient de frottement 0,12, durée de vie > 5000 m. Moule sec : espacement WC3C 50 μm, adhérence 0,8 N, durée de vie > 10 ⁶ fois. Composants de roulement : coefficient de frottement

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

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

Fonction caractéristiques	Sous-classes	Système matériel	Paramètres clés	Indicateurs de performance	Demande d'ingénierie
	Ne le faites pas			heures ±10 ³ heures	WC5MoS ₂ 0,15, service > 10 ⁴ heures.
Bionique et carbure intelligent	Bionique	WCCo dégradé, WCCo poreux	Porosité : 10 % ± 1 %, gradient de Co : 5 % 15 % ± 1 %, taille des pores : 110 μm ± 0,1 μm, température de frittage : 1400 °C ± 10 °C	Dureté : HV 1450±30, Ténacité : K _{IC} 16 MPa·m ^{1/2} ±0,5, Taux d'absorption d'énergie : >50%±5%, Durée de vie en fatigue : >10 ⁶ fois±10 ⁵ fois	Pièces de réduction de poids pour l'aviation : Densité du WCCo à gradient de 12 g/cm ³ , durée de vie en fatigue > 10 ⁶ fois. Implants biomédicaux : Taille des pores du WCCo poreux 5 μm, compatibilité > 95 %, durée de vie > 10 ans. Moule intelligent : Densité du WCCo à gradient K _{IC} 16 MPa·m ^{1/2} , durée de vie > 10 ⁶ fois.
	intelligent réponse Matériel		Teneur en NiTi : 3 % ± 0,1 %, granulométrie : 0,51 μm ± 0,01 μm, taille du capteur : 110 μm ± 0,1 μm, température de frittage : 1400 °C ± 10 °C	Dureté : HV 1450±30, Taux de déformation : 0,05 %±0,01 %, Temps de réponse : 0,8 ms±0,1 ms, Précision : >95 %±2 %	Outil intelligent : taux de déformation WC3NiTi 0,05 %, effort de coupe < 10 N, durée de vie > 5 000 m. Composants robotisés : temps de réponse 0,8 ms, précision > 95 %. Capteur aéronautique : dureté HV 1450, durée de vie en fatigue > 10 ⁶ fois.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Une brève histoire du développement du carbure cimenté à gradient

Les métaux durs à gradient fonctionnel (FGHM) sont des carbures cimentés innovants qui optimisent les performances grâce à une structure à gradient fonctionnel. Leur développement reflète l'évolution continue de la science des matériaux et des technologies d'ingénierie. Le carbure cimenté à gradient améliore significativement la durée de vie des outils, la résistance à la fatigue thermique et les propriétés mécaniques grâce à des changements de phase ou de composition progressifs.

1. Germination conceptuelle et fondement théorique (années 1970-1980)

L'origine du carbure cimenté à gradient remonte aux années 1970, lorsque le concept de matériaux à gradient fonctionnel (FGM) est apparu pour la première fois dans la recherche universitaire au Japon et en Allemagne. Durant cette période, la recherche théorique sur les FGM s'est principalement concentrée sur la résolution du problème de contrainte interfaciale causé par les différences de coefficients de dilatation thermique ou de propriétés mécaniques des composites traditionnels, en particulier la stabilité des matériaux dans les environnements à haute température. En tant que matériau composite composé de carbures (tels que le carbure de tungstène WC) et de phases de liaison métalliques (telles que le cobalt Co), le carbure cimenté est devenu un pôle de recherche majeur en raison de sa large application dans les outils de coupe, les moules et les pièces résistantes à l'usure. Cependant, les premières recherches se sont concentrées sur le carbure cimenté à structure uniforme, et l'application pratique de la conception à gradient n'a pas encore été définie, et reste davantage au stade de l'exploration théorique fondamentale de la science des matériaux.

Événements marquants

Dans les années 1970, l'Agence nationale de recherche et développement aérospatial du Japon (NASDA, aujourd'hui JAXA) a commencé à explorer les possibilités des matériaux à gradient fonctionnel dans la recherche en technologies spatiales, notamment dans les systèmes de protection thermique des engins spatiaux (TPS). L'objectif était de développer des matériaux de barrière thermique capables de résister à des températures de surface allant jusqu'à 2 000 K et à une différence de température de 1 000 K avec une épaisseur de 10 mm. Ces recherches ont fourni une base théorique importante pour le carbure cimenté à gradient ultérieur et ont stimulé l'intérêt pour les structures à gradient afin d'améliorer les propriétés des matériaux.

En 1978, l'Agence japonaise pour la science et la technologie (STA) a lancé le projet « Matériaux planaires spatiaux », qui a favorisé davantage la recherche conceptuelle sur les FGM.

En 1984, le chercheur japonais Toshio Hirai a publié un article dans le Journal of Materials Science, introduisant officiellement le terme « matériaux à gradient fonctionnel » et vérifiant expérimentalement le potentiel de réduction des fissures de contrainte thermique dans les composites céramique-métal par gradient de composition, marquant un tournant dans la recherche sur les FGM de la théorie à l'application.

Dans les années 1980, l'Institut Max Planck en Allemagne a également commencé à explorer la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

faisabilité de la conception de gradients dans la recherche sur les composites à matrice métallique, jetant ainsi les bases d'une coopération transnationale dans le développement ultérieur de gradients de carbures cimentés.

Chiffres clés

Toshio Hirai, du Japon, a été un pionnier à ce stade. Dans les années 1980, il a vérifié l'effet du gradient de composition sur la relaxation des contraintes thermiques par des expériences systématiques, notamment dans l'application de matériaux composites Al_2O_3 / Ni, qui ont inspiré la conception de gradients de carbure cimenté. Koichi Masuda, en tant que représentant de la recherche sur les matériaux de barrière thermique au Japon, a proposé le concept initial d'utilisation de la structure de gradient pour optimiser les performances dans un environnement à haute température. Bien que sa principale contribution se concentre dans le domaine des céramiques, elle inspire indirectement la recherche sur le carbure cimenté. Hans-Joachim Dudek, d'Allemagne, mène également des recherches sur les composites à matrice métallique à l'Institut Max Planck, explorant l'influence de la structure de gradient sur les propriétés mécaniques, ce qui fournit un support théorique pour la conception ultérieure de gradients de carbure cimenté.

2. Avancées technologiques et introduction des gradients fonctionnels (années 1990)

Dans les années 1990, grâce aux progrès considérables des technologies de traitement des matériaux, notamment l'innovation dans la métallurgie des poudres et le traitement thermique, le carbure cimenté à gradient est passé de la théorie à la pratique. Durant cette période, la recherche s'est orientée vers l'introduction de gradients fonctionnels dans la zone proche de la surface du carbure cimenté afin d'améliorer la résistance à l'usure, la résistance aux fissures thermiques et la durée de vie des outils de coupe. Des instituts de recherche européens (comme l'Allemagne) et nord-américains (comme les États-Unis) ont réalisé des avancées majeures dans les procédés de frittage (comme le frittage-HIP, c'est-à-dire la technologie de pressage isostatique à chaud par frittage), réalisant l'industrialisation initiale des structures à gradient et jetant les bases de l'application commerciale du carbure cimenté à gradient. Parallèlement, la combinaison de la technologie de revêtement et des structures à gradient est également devenue un pôle de recherche majeur durant cette période, favorisant l'amélioration globale des performances du carbure cimenté.

Événements marquants

En 1992, Widia (filiale du groupe Krupp, fusionnée plus tard avec Sandvik) en Allemagne a collaboré avec l'université RWTH d'Aix-la-Chapelle pour lancer un projet de recherche et développement sur le carbure cimenté à gradient. Ce projet visait à former une couche à gradient de teneur en Co à la surface du carbure cimenté WC-Co grâce au frittage sous atmosphère réactive. Cette technologie a permis d'obtenir une distribution à gradient de teneur en Co de 10 % à 5 % en contrôlant le potentiel carbone et le gradient de température pendant le frittage, améliorant ainsi significativement la résistance à l'usure de l'outil et constituant un point de départ essentiel pour le développement du carbure cimenté à gradient.

En 1995, Widia a officiellement lancé la première série de plaquettes de coupe en carbure à gradient

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fonctionnel, utilisant la technologie de frittage sous atmosphère réactive pour augmenter la durée de vie de l'outil d'environ 30 % par rapport au carbure homogène traditionnel. Cette performance a été largement saluée lors de la Conférence européenne sur les matériaux durs de 1996.

En 1998, le 5e Symposium international sur les matériaux à gradient fonctionnel s'est tenu à Dresde, en Allemagne, attirant plus de 200 experts de plus de 20 pays et régions du monde entier pour discuter de la conception de la microstructure, du processus de fabrication et des perspectives d'application potentielles du carbure cimenté à gradient, favorisant ainsi davantage la coopération internationale et les échanges techniques.

Chiffres clés

L'Allemand Walter Lengauer a collaboré étroitement avec Widia dans les années 1990 pour piloter le développement de la technologie de frittage sous atmosphère réactive. Il a obtenu une distribution à gradient de Co et Ti (C, N) en ajustant les paramètres de frittage (tels que la température à 1 400 °C et la pression à 50 MPa). Cette technologie a ensuite été largement utilisée dans la production industrielle et a jeté les bases de l'industrialisation du carbure cimenté à gradient. Le chercheur américain Zhigang Zak Fang a commencé à s'intéresser à la conception à gradient du système WC-Co à la fin des années 1990 et a proposé une idée préliminaire de réalisation du gradient de Co par traitement thermique et carburation. Il a ensuite créé une plateforme de recherche connexe à l'Université de l'Utah, apportant un soutien important aux recherches ultérieures. De plus, le Japonais Yoshinari Miyamoto a apporté un soutien théorique interdisciplinaire à la conception de la structure à gradient du carbure cimenté dans le cadre de ses recherches sur les matériaux à gradient fonctionnel.

Produits clés

Dans les années 1990, Widia a lancé des plaquettes de coupe en carbure à gradient fonctionnel revêtu (comme la série Widia TN), qui utilisaient des revêtements CVD (TiN, Ti(C,N)) combinés à des substrats à gradient et étaient largement utilisées dans la coupe de l'acier et de la fonte. La dureté de surface de ces plaquettes a atteint HV 1600±50, et leur résistance à l'usure a été améliorée d'environ 25 % par rapport au carbure traditionnel, devenant ainsi un produit représentatif des applications industrielles à cette époque.

3. Application industrielle et optimisation des processus (années 2000)

À l'aube du XXIe siècle, les applications industrielles du carbure cimenté à gradient se sont rapidement développées, notamment dans les domaines de l'usinage des métaux, des pièces d'usure et de la fabrication de moules. Dans les années 2000, les chercheurs ont obtenu un contrôle plus précis du gradient en améliorant les procédés de métallurgie des poudres, les technologies de traitement thermique et la technologie des grains ultrafins. Le développement du carbure cimenté à gradient à grains ultrafins a constitué une avancée majeure à cette époque. La combinaison de la technologie des grains ultrafins (granulométrie inférieure à 1 µm) et de la conception du gradient améliore non seulement la dureté et la résistance du carbure cimenté, mais aussi ses performances anti-écaillage, répondant ainsi aux besoins urgents de l'usinage à grande vitesse et des matériaux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

difficiles à usiner.

Événements marquants

En 2002, Walter Lengauer et Klaus Dreyer ont publié un article de synthèse intitulé « Gradient Sintering of Hardmetals : Processing and Properties » dans l'International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Cet article résumait systématiquement l'application de la technologie de frittage sous atmosphère réactive au carbure cimenté à gradient et analysait l'effet d'optimisation du gradient de teneur en Co sur la dureté (HV 1 400-1 800) et la ténacité (K_{1c} 10-15 MPa·m^{1/2}). Cette étude fournit des indications précieuses sur les procédés pour l'industrie et marque un tournant dans la recherche sur le carbure cimenté à gradient, du laboratoire à la production à grande échelle.

En 2005, Sandvik a collaboré avec l'Institut royal de technologie (KTH) de Suède pour développer un carbure cimenté à gradient de grains ultrafins. La granulométrie a été réduite à 0,5 µm, la dureté a été portée à HV 1900±50 et la résistance à la fissuration thermique a été améliorée d'environ 20 %. Ce carbure est largement utilisé pour l'usinage des alliages de titane dans le secteur aéronautique.

En 2009, la société américaine Kennametal Corporation a utilisé la technologie de dépôt de poudre par laser (LPD) pour préparer des outils en carbure à gradient destinés à la fabrication d'outils de forgeage à chaud. La durée de vie de l'outil a été prolongée d'environ 15 à 20 % par rapport aux matériaux traditionnels. Cette technologie a suscité un vif intérêt au sein de la communauté industrielle nord-américaine.

Chiffres clés

Dans les années 2000, Zhigang Zak Fang a développé un procédé de traitement thermique par carburation au sein du Laboratoire de recherche sur les poudres de l'Université de l'Utah. Ce procédé a permis d'obtenir une distribution graduée de la teneur en Co dans le WC-Co et d'augmenter la dureté de HV 1400 à HV 1600. Cette technologie a été adoptée par Kennametal et appliquée à la production. Ses recherches ont mis l'accent sur le contrôle de l'épaisseur de la couche graduée (0,1-0,5 mm) pendant le processus de carburation, fournissant des données pour une optimisation ultérieure. L'Allemand Hans van den Berg (Widia) a apporté d'importantes contributions à l'optimisation de l'adéquation des substrats et des revêtements gradués. En ajustant l'épaisseur du revêtement CVD (5-10 µm) et la force de liaison interfaciale de la couche graduée, les performances globales de l'outil ont été considérablement améliorées. Håkan Engström (Sandvik) de Suède a dirigé le développement du carbure cimenté à gradient de grains ultrafins, optimisé le processus de mélange et de frittage de poudre et promu l'application industrielle de cette technologie.

Produits clés

Dans les années 2000, Sandvik a lancé des plaquettes de coupe en carbure à gradient contenant du Ti(C,N) (comme la série GC4215), dont la granulométrie est d'environ 0,8 µm et la dureté HV 1800±50. Elles offrent une meilleure résistance à l'usure et aux fissures thermiques que les carbures homogènes traditionnels et sont largement utilisées pour la coupe de l'acier rapide et de l'acier inoxydable. Kennametal a lancé des outils en carbure à gradient avec des couches de surface enrichies en Co (comme la série KC7310), dont la teneur en Co en surface passe progressivement de 10 % à 5 %, ce qui améliore la ténacité à la rupture (K_{1c} environ 12 MPa·m^{1/2}) et convient à la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

coupe intermittente et aux usinages intensifs.

4. Fabrication additive et innovation moderne (des années 2010 à aujourd'hui)

Depuis les années 2010, l'essor de la fabrication additive (FA) a révolutionné le carbure cémenté à gradient. Des procédés avancés tels que le dépôt laser (LD) et la fusion sélective par laser (SLM) permettent d'obtenir des gradients de composition grâce à l'alimentation multi-poudres en un seul cycle de fabrication, dépassant ainsi les limites de la métallurgie des poudres traditionnelle. Durant cette période, la recherche sur le carbure cémenté à gradient ne se limitait pas aux outils de coupe, mais s'est également étendue à l'aérospatiale (moules pour aubes de turbine, par exemple), aux implants médicaux (prothèses de hanche, par exemple) et aux domaines militaires (matériaux de blindage, par exemple), démontrant ainsi son potentiel multifonctionnel.

Événements marquants

Français En 2012, Zhigang Zak Fang et son équipe ont publié un article dans Acta Materialia (Volume 75, pages 135-144), décrivant le mécanisme cinétique de préparation de carbure cémenté à gradient WC-Co par traitement thermique de carburation. La dureté de surface est passée de HV 1052 à HV 1344, soit une augmentation d'environ 28 %. La transition en douceur de la couche de gradient de Co (épaisseur d'environ 0,2 mm) a été observée par microscopie électronique à balayage (MEB). Cette étude fournit des données clés pour l'industrialisation du carbure cémenté à gradient. En 2015, l'Institut Fraunhofer (Division IKTS) en Allemagne a utilisé la technologie SLM pour préparer des pièces à gradient WC-Co, montrant une distribution spatiale de la dureté à gradient augmentant de HV 1400 à HV 1600. Malgré des problèmes de microfissures, cela a jeté les bases d'une optimisation ultérieure du procédé.

En 2018, le Laboratoire national d'Oak Ridge (ORNL) aux États-Unis a collaboré avec Kennametal pour développer un prototype de carbure cémenté à gradient basé sur la fusion laser sur lit de poudre (LPBF) destiné aux moules d'aubes de turbines d'aviation. Ce prototype a permis d'augmenter la durée de vie de l'outil d'environ 40 % par rapport aux matériaux traditionnels (environ 5 000 cycles d'impact en conditions d'essai). En 2020, l'étude de métaux nanostructurés à gradient combinés à des alliages à haute entropie (tels que FeCoCrNiMo) a permis d'améliorer de manière synergique la résistance et la ductilité. L'expérience a été publiée dans Nature Materials (volume 19, pages 1123-1130), montrant que la résistance à la compression atteignait 504 MPa à 600 °C et l'allongement 82 %, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'application du carbure cémenté à gradient dans des environnements extrêmes.

En 2023, la Chine a lancé l'outil de coupe en carbure à gradient YG20C, qui utilise la technologie de dépôt laser pour augmenter la dureté de HV 1500 à HV 1700 et améliorer l'efficacité de coupe d'environ 20 % (sur la base des tests standard ISO 3685).

Chiffres clés

Français Igor Konyashin a dirigé la recherche sur l'optimisation du carbure cémenté à gradient fonctionnel à l'Université nationale russe de recherche technologique (MISiS), a développé la série de produits Master Grades® (dureté HV 1700±50), et son équipe a optimisé la structure du gradient

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

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

WC-Co grâce à la technologie SLM. José L. Garcia a étudié le mécanisme de formation du carbure cimenté à gradient par modélisation thermodynamique à l'Institut espagnol de nanotechnologie (INA) et a proposé un schéma d'optimisation de la conception du gradient basé sur la méthode CALPHAD. Zhigang Zak Fang a continué à promouvoir la technologie de traitement thermique de carburation, qui a été adoptée par Sandvik et Kennametal et appliquée à la production. Li Zhang de Chine a étudié le carbure cimenté à gradient d'entropie élevé à l'Université Tsinghua, avec une dureté de HV 1900 (sur la base de données expérimentales).

Produits clés

Dans les années 2010, Sandvik a lancé des forets multicouches en carbure à gradient (comme la série Coromant) pour le forage pétrolier, dont la durée de vie est environ 30 % supérieure à celle des forets traditionnels (selon les tests de la norme API). En 2015, Kennametal a lancé la série KCMS d'outils en carbure à gradient pour l'usinage des aubes de moteurs d'avion, avec une dureté HV 1800. En 2023, l'outil de coupe en carbure à gradient YG20C de ZCC a été utilisé dans l'industrie automobile, augmentant la vitesse de coupe d'environ 20 %.

5. Situation actuelle et perspectives d'avenir (perspectives 2025)

Au 13 juin 2025, le carbure cimenté à gradient occupait une place importante dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'automobile, des implants médicaux et de l'armée. La généralisation de la fabrication additive a accéléré le développement de la conception de gradients sur mesure, et la recherche sur la stabilité thermique et les micromécanismes (tels que l'évolution des dislocations et le comportement des changements de phase) est devenue une priorité pour le monde universitaire et industriel. Parallèlement, les progrès rapides de l'intelligence artificielle (IA) ont apporté de nouvelles opportunités et de nouveaux défis à la recherche, au développement et à l'application du carbure cimenté à gradient, notamment dans le contexte de l'industrie chinoise du tungstène. Le développement futur du carbure cimenté à gradient témoigne d'une tendance à la diversification et à l'intelligence.

Conception de matériaux pilotée par l'IA

Les algorithmes d'IA, tels que les modèles d'apprentissage automatique et les réseaux antagonistes génératifs (GAN), sont largement utilisés pour prédire la relation entre la microstructure et les performances des carbures cimentés à gradient. En analysant un grand nombre de données expérimentales et de résultats de simulation par éléments finis, l'IA peut optimiser la distribution de composants tels que Co et Ti (C, N), prédire avec précision le meilleur schéma de gradient pour la dureté (valeur cible HV 1800±50) et la ténacité à la rupture ($K_{1c} > 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), raccourcissant ainsi considérablement le cycle expérimental traditionnel et devrait réduire le temps de R&D de plus de 50 %. Cette méthode a été initialement vérifiée dans les processus de R&D d'entreprises telles que Sandvik et Kennametal, démontrant une efficacité et une fiabilité élevées. Par exemple, Sandvik a utilisé un modèle d'IA pour optimiser le rapport de la structure du gradient WC-Co-Ti (C, N), et l'écart d'uniformité de la dureté a été réduit à moins de 0,01 mm.

Intégration de la fabrication intelligente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Associée à l'Internet industriel des objets (IIoT) et à la technologie des jumeaux numériques, l'IA est intégrée au processus de fabrication additive pour surveiller en temps réel le débit d'alimentation en poudre, la puissance laser et les paramètres de température afin de garantir l'uniformité et la cohérence de la couche de gradient. Le système d'IA peut ajuster les paramètres du processus SLM en fonction des données en temps réel afin de contrôler l'écart géométrique de la couche de gradient à 0,01 mm près, augmentant ainsi le rendement d'environ 10 %. Sandvik a déployé une ligne de production similaire optimisée par l'IA dans son usine intelligente de Sandviken, en Suède, afin d'automatiser la production d'outils en carbure à gradient, améliorant ainsi considérablement l'efficacité de la production et la qualité des produits. De plus, Kennametal développe un système de fabrication en boucle fermée basé sur l'IA qui fournit un retour d'information en temps réel sur la température du bain de fusion ($< 300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) et les données de contrainte afin d'optimiser la microstructure de la couche de gradient.

Optimisation adaptative des performances

L'IA collecte les données de température ($< 300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$), de contrainte ($< 500\text{ MPa}$) et d'usure pendant le processus de coupe grâce à des capteurs intégrés, et ajuste dynamiquement les paramètres de traitement thermique de la structure à gradient (comme la température de recuit $1\text{ }200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, le temps de maintien 2 heures). Cette capacité adaptative permet au carbure cémenté à gradient de maintenir une excellente stabilité des performances sur une large plage de températures de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, et est particulièrement adaptée aux environnements à haute température et à fortes contraintes tels que les aubes de moteurs d'avion, les composants de turbines automobiles et les équipements sous-marins. Kennametal développe des technologies connexes et prévoit de lancer un prototype d'outil en carbure à gradient aux performances adaptatives d'ici fin 2025, avec pour objectif de maintenir une dureté de $\text{HV } 1\text{ }700 \pm 50$ à $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Durabilité et protection de l'environnement

L'IA optimise l'efficacité d'utilisation des matières premières et réduit l'utilisation de métaux précieux comme le cobalt grâce à des calculs de simulation, ce qui devrait réduire la consommation de matériaux de plus de 5 %. Parallèlement, combinés à des matériaux recyclables (comme la poudre de tungstène recyclée) et à des procédés de fabrication bas carbone (comme la réduction de la consommation d'énergie de frittage de 10 %), les procédés de production de carbure cémenté à gradient pilotés par l'IA respectent les normes mondiales de fabrication verte de 2025 (telles que la directive européenne sur l'écoconception et le plan d'action chinois Carbon Peak), réduisant ainsi l'empreinte carbone et renforçant le potentiel de développement durable du secteur. Par exemple, ZCC a lancé un projet pilote d'IA pour optimiser la production de carbure cémenté à gradient pour la poudre de tungstène recyclée, et devrait atteindre une réduction annuelle de 500 tonnes de CO_2 en 2025.

L'industrie chinoise du tungstène

Le 3 janvier 2025, le compte officiel WeChat de China Tungsten Online a publié un article proposant officiellement que 2025 soit la première année d'IA pour l'industrie chinoise du tungstène. Cette initiative marque un tournant majeur dans la transformation intelligente de l'industrie chinoise du

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungstène. China Tungsten Online a souligné que l'IA transformera l'industrie du carbure cimenté grâce à la conception de matériaux et à l'optimisation des procédés basées sur les données, et fournira un soutien technique solide à la recherche et au développement du carbure cimenté à gradient. Par exemple, l'IA a été utilisée pour analyser la distribution des ressources en tungstène et les paramètres de traitement, optimiser les performances des structures à gradient et devrait promouvoir la compétitivité de la Chine sur le marché mondial du carbure cimenté. En outre, China Tungsten Online a également souligné que l'arrivée de la première année de l'IA favorisera l'intégration numérique de l'amont et de l'aval de la chaîne industrielle du tungstène, comme la surveillance en temps réel du processus de frittage du carbure cimenté à gradient grâce à des capteurs intelligents, réduisant le taux de défauts de $5\% \pm 1\%$.

Concept avancé de fabrication intelligente de tungstène en Chine

En tant qu'entreprise leader dans l'industrie chinoise du tungstène, China Tungsten Intelligent Manufacturing a proposé deux nouveaux concepts avancés pour le carbure cimenté, enrichissant ainsi les idées de développement dans l'environnement social et technologique de l'IA. Premièrement, le concept de carbure cimenté à haute entropie introduit des éléments d'alliage à haute entropie (tels que FeCoCrNiMo) dans le carbure cimenté à gradient pour former une structure à gradient multiphasé. Cette structure améliore la stabilité thermique et la résistance à la corrosion du matériau en augmentant la valeur d'entropie ($> 1,5 R$). Les données expérimentales montrent que la dureté peut atteindre $HV 1900 \pm 50$ et que la ténacité à la rupture est améliorée d'environ $20\% \pm 3\%$, ce qui est particulièrement adapté aux environnements extrêmes tels que l'aérospatiale et les équipements sous-marins. China Tungsten Intelligent Manufacturing s'efforce de développer du carbure cimenté à gradient d'entropie élevé. Deuxièmement, le concept de dosage des nuances de carbure cimenté permet le suivi des performances et la production personnalisée de chaque lot grâce à un système de gestion numérique piloté par l'IA. Chaque lot de carbure cimenté à gradient est doté d'un identifiant numérique unique. Le système d'IA garantit un contrôle des écarts de performance à $0,005 \text{ mm}$ près grâce à l'analyse des mégadonnées, répondant ainsi aux exigences de cohérence et de traçabilité de la fabrication haut de gamme. Ces concepts reflètent non seulement l'innovation technologique chinoise dans le domaine du carbure cimenté, mais établissent également une nouvelle référence de développement pour l'industrie mondiale du carbure cimenté à gradient.

Le développement du carbure cimenté à gradient a connu un bond en avant, passant de l'exploration théorique à l'application industrielle. Son essor repose sur la coordination entre la science des matériaux, les technologies de traitement et les besoins applicatifs. Grâce au soutien de l'environnement technologique de l'IA, à l'initiative « IA Year One » de China Tungsten Industry et au concept innovant de « China Tungsten Intelligent Manufacturing », le carbure cimenté à gradient devrait poursuivre son développement intelligent, personnalisé et durable, devenir la technologie phare des matériaux d'outillage et de structure à l'avenir, et contribuer fortement à la transformation efficace et écologique de l'industrie manufacturière mondiale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Bille en carbure

La bille en carbure cémenté est un matériau sphérique hautes performances composé de carbure (tel que le carbure de tungstène WC, le carbure de titane TiC) comme phase dure et de cobalt (Co) ou de nickel (Ni) comme phase de liaison. Elle est largement utilisée dans l'industrie, le secteur militaire et la fabrication de précision grâce à son excellente dureté, sa résistance à l'usure et aux chocs. Ce document présente une introduction complète, basée sur les connaissances en science des matériaux et les applications d'ingénierie, couvrant les caractéristiques, les scénarios d'application, la comparaison des matériaux, le procédé de fabrication et le tableau des spécifications dimensionnelles.

1. Caractéristiques des billes en carbure cémenté

Les billes en carbure adoptent généralement le système WC-Co, avec une densité de 14-15 g/cm³, une dureté HV de 1400-1800 et une ténacité à la rupture (K_{1c}) de 10-20 MPa·m^{1/2}, dépassant largement les billes en acier traditionnelles (densité de 7,75-8,05 g/cm³, dureté HV de 200-400). Sa conception sphérique optimise le contact de surface et la répartition des contraintes, sa résistance à la compression peut atteindre 3000-4000 MPa et sa résistance à l'usure est supérieure à celle des billes en céramique (< 0,01 mm³/m). Grâce au frittage de précision (1400 °C ± 10 °C) ou à la fabrication additive, la granulométrie peut être contrôlée entre 0,5 et 1 µm et la rugosité de surface (Ra) est aussi faible que 0,01 µm, répondant ainsi aux exigences de haute précision. Des formules spéciales (comme WC-TiC-Ni) permettent d'ajuster la densité à 12-13 g/cm³, en tenant compte à la fois de la légèreté et des performances.

2. Performances des billes en carbure cémenté

Dureté et résistance à l'usure élevées

Les billes en carbure présentent une dureté extrêmement élevée (HV 1400-1800), ce qui leur permet d'être performantes en conditions de frottement à grande vitesse (> 10⁴ tr/min) ou d'impact continu (> 2000 N). Leur taux d'usure est de seulement 0,02 mm³/m, ce qui est nettement supérieur à celui des billes en acier traditionnelles (> 0,1 mm³/m). Elles conviennent à une utilisation prolongée dans des environnements abrasifs ou coupants et résistent efficacement à l'usure superficielle et à l'écaillage des matériaux.

Excellente résistance aux chocs

La ténacité à la rupture (K_{1c}) est comprise entre 10 et 20 MPa·m^{1/2}, et la résistance aux cycles de fatigue est supérieure à 10⁶ fois. Il présente une excellente résistance à la propagation des fissures et peut supporter des charges d'impact instantanées allant jusqu'à 4 000 MPa. Il est particulièrement adapté aux scénarios de fortes contraintes dans les sous-munitions militaires ou le grenailage.

Excellente stabilité thermique

Ses performances sont stables sur une large plage de températures (-50 °C à 500 °C ± 10 °C) et son coefficient de dilatation thermique est de seulement 6 × 10⁻⁶ /°C, bien inférieur à celui de l'acier (12 × 10⁻⁶ /°C). Cela garantit une taille et des performances constantes dans des environnements à très

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hautes ou basses températures, ce qui le rend adapté aux conditions difficiles telles que celles des moteurs d'avion ou des pompes chimiques.

Excellente uniformité et précision

L'erreur de symétrie sphérique est contrôlée à 0,001 mm près et la rugosité de surface peut atteindre 0,01 μm , offrant une précision géométrique et une cohérence de roulement extrêmement élevées, répondant aux exigences des instruments de précision (tels que les vis à billes) ou des équipements optiques pour des tolérances au niveau du micron.

Excellente résistance à la corrosion

Grâce à un revêtement spécial (tel que TiN) ou une formulation (telle que WC-TiC-Ni), il est résistant à la corrosion acide et alcaline (pH 1-14), et le taux d'oxydation de surface est inférieur à 0,1 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{h}$, ce qui prolonge la durée de vie en environnement chimique, particulièrement adapté aux pompes chimiques ou aux équipements marins.

Transfert d'énergie efficace

La conception sphérique optimise la répartition des contraintes et offre un rendement de transfert d'énergie élevé ($> 90\% \pm 2\%$). Lors d'une projection à grande vitesse (par exemple, 800-1 000 m/s) ou d'un impact, elle concentre la libération d'énergie pour améliorer la pénétration ou le renforcement.

4. Scénarios d'application des billes en carbure cémenté

Roulements et soupapes

Les billes en carbure d'un diamètre de 0,5 à 10 mm sont utilisées pour les roulements à grande vitesse ($> 10^4 \text{ tr}/\text{min}$), avec une résistance à l'usure de $< 0,01 \text{ mm}^3 / \text{m}$ et une durée de vie de $> 10^5$ heures $\pm 10^3$ heures, adaptées aux moteurs d'avion.

Abrasifs et grenaillage

Des billes de 1 à 5 mm sont utilisées pour le grenaillage (pression de 0,2 à 0,5 MPa), avec une couche de durcissement de surface de 0,1 à 0,2 mm, prolongeant la durée de vie des pièces en acier de $20\% \pm 3\%$.

Instruments de précision

Les billes de 0,1 à 1 mm sont utilisées pour les vis à billes dans les instruments optiques, avec une tolérance de $< 0,001 \text{ mm}$ et une stabilité de $> 99,9\%$, adaptées aux équipements semi-conducteurs.

Utilisation militaire

Billes de 10 à 50 mm sous forme de sous-munitions ou de fragments (vitesse initiale 800 à 1 000 m/s), pénètrent les blindages légers ($< 50 \text{ mm}$), conviennent aux munitions rôdeuses ou aux grenades.

pompes chimiques

Bille en carbure résistante à la corrosion (WC-TiC-Ni), résistante aux acides et aux alcalis (pH 1-14), stabilité d'écoulement $> 95\% \pm 2\%$.

5. Comparaison entre les billes en carbure et les matériaux traditionnels

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Matériel	Densité (g/cm³)	Dureté (HV)	K _{1c} (MPa·m ^{1/2})	Avantages	Limites
Bille en carbure	14-15	1400-1800	10-20	Haute pénétration, résistance à l'usure	Coût élevé et densité élevée
Bille d'acier	7h75-8h05	200-400	50-100	Faible coût et traitement facile	Faible pénétration
Billes en céramique (Si ₃ N ₄)	3.2-3.3	1400-1600	6-8	Léger et résistant aux hautes températures	Haute fragilité
Boule de verre	2,5-2,6	500-600	0,5-1	faible coût	Faible résistance à l'usure

Les billes en carbure sont supérieures aux billes d'acier et de verre en termes de dureté et de résistance à l'usure, et proches des billes en céramique, mais la ténacité est meilleure et la densité élevée est la principale limitation.

6. Dimensions et spécifications

Voici les dimensions courantes des billes en carbure cimenté, adaptées à différents scénarios d'application. Ces données sont basées sur les normes industrielles (telles que la norme ISO 3290) et les besoins réels de production :

Diamètre (mm)	Poids (g)	Tolérance (± mm)	Rugosité de surface (Ra, µm)	Dureté (HV)	Applications recommandées
0,1	0,0007	0,0005	0,005	1400-1500	Roulements miniatures, instruments
0,5	0,0087	0,001	0,01	1450-1550	Vis à billes de précision
1.0	0,069	0,001	0,01	1500-1600	Vannes, grenaillage
5.0	1,72	0,002	0,01	1550-1650	Abrasifs, roulements à grande vitesse
10.0	13,8	0,002	0,01	1600-1700	Pompes chimiques, sous-munitions militaires
20.0	110	0,005	0,015	1650-1750	Ogive à fragmentation, pièces d'impact
50,0	1720	0,01	0,02	1700-1800	Projectiles cinétiques militaires, équipements lourds

Remarque : Le poids est calculé sur la base d'une densité de 14,5 g/cm³. Les tolérances et la rugosité peuvent être ajustées selon les besoins spécifiques (± 0,0001 mm). Des spécifications spécifiques (diamètre de 0,05 mm ou 100 mm, par exemple) nécessitent une production sur mesure.

7. Processus de fabrication

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Métallurgie des poudres

La poudre WC-Co (90:10) a été frittée à $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ sous vide (10^{-3} Pa), diamètre de bille 0,1-50 mm, dureté HV 1500 ± 30 .

Fabrication additive

La technologie SLM peut imprimer des formes sphériques complexes avec une épaisseur de couche de $50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ et une précision de $\pm 0,01$ mm, ce qui convient à la personnalisation de petits lots.

Traitement de surface

Diamant poli à $Ra < 0,01 \mu\text{m}$, TiN revêtu PVD ($5-10 \mu\text{m}$), résistance à la corrosion $< 0,1 \text{ mg/cm}^2/\text{h}$.

Contrôle de qualité

Le balayage laser détecte les erreurs sphériques ($< 0,001$ mm) et le contrôle par ultrasons détecte les défauts internes ($< 0,05$ mm).

Grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques et à leur large champ d'application, les billes en carbure cémenté sont devenues des composants clés dans les secteurs industriel et militaire. Leurs spécifications et procédés de fabrication variés constituent une base solide pour leur utilisation dans des applications de haute précision et de grande durabilité.

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

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

appendice:

Carbure à réponse intelligente

Le carbure cimenté à réponse intelligente est un nouveau type de matériau qui intègre les avantages du carbure cimenté traditionnel en termes de dureté élevée, de résistance à l'usure et de ténacité à la rupture (K_{1c}). Il présente également des caractéristiques d'auto-adaptation ou de réponse aux stimuli externes (tels que la température, la pression, le champ magnétique ou l'environnement chimique). Son objectif est de remplacer le cobalt (Co) ou le nickel (Ni) traditionnels par une phase de liaison intelligente (comme l'alliage à mémoire de forme NiTi, un polymère thermosensible ou des nanoparticules réactives intégrées) pour obtenir un ajustement dynamique des performances et une fonction d'auto-réparation. Ce document est une extension complète basée sur la science des matériaux, la technologie des matériaux intelligents et les applications d'ingénierie, couvrant les caractéristiques, les facteurs d'influence, les bases théoriques, les scénarios d'application, la comparaison des matériaux, le processus de fabrication et les orientations futures du développement.

1. Caractéristiques du carbure à réponse intelligente

Le carbure cimenté à réponse intelligente est basé sur du carbure de tungstène (WC), du carbure de titane (TiC) ou du carbure de bore (B_4C) comme phase dure, et est construit avec une phase de liaison intelligente (telle que NiTi, CuAlNi ou des nanocomposites dopés au graphène). La plage de densité est de $10-14 \text{ g/cm}^3$, qui peut être optimisée à $9-12 \text{ g/cm}^3$ grâce à une conception poreuse (porosité de 5 % à 15 %) ou à des additifs légers (tels que Al_2O_3 , SiC). Les caractéristiques de réponse intelligente comprennent : l'auto-ajustement de la dureté sous les changements de température (HV 1200-1600), la réduction du coefficient de frottement sous champ magnétique ($10\% \pm 2\%$) ou l'auto-cicatrisation en cas de fissures (taux de récupération de $80\% \pm 5\%$). Ces caractéristiques lui permettent d'être performant sous des charges dynamiques et des environnements extrêmes.

2. Avantages en termes de performances

Adaptabilité

Dans la plage de température de 50°C à 300°C , en fonction de la transformation de phase martensite-austénite, la dureté est ajustée dynamiquement et l'absorption d'énergie d'impact atteint $90\% \pm 3\%$, ce qui convient aux environnements à haute température.

Auto-guérison

Enrobé dans des microcapsules de SiC ou de polymère, l'adhésif se libère lorsque la fissure se propage, avec un taux de récupération K_{1c} de $80\% \pm 5\%$, prolongeant la durée de vie.

Réponse polyvalente

Sous des champs magnétiques ($> 1 \text{ T}$) ou des changements de pH (4-7), les propriétés de surface (telles que la lubrification ou la résistance à la corrosion) peuvent être ajustées pour s'adapter à des conditions de travail complexes.

Durabilité

Par rapport au carbure cimenté conventionnel, le taux d'usure est réduit de $15\% \pm 2\%$ ($< 0,04 \text{ mm}^3/\text{m}$) grâce à l'effet tampon dynamique de la phase intelligente.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Facteurs d'influence et discussion théorique

Composition de la phase de liaison

la teneur en NiTi est de 5%-15%±1%, l'effet de mémoire de forme est significatif et K_{1c} augmente de 15%±2% (à 18 MPa·m^{1/2} ± 0,5) ; lorsqu'elle est >20%±1%, la dureté diminue de 10%±3% (à HV 1200±30). La théorie de la transformation martensitique souligne qu'une faible teneur en NiTi optimise la déformation (<5%), et une teneur élevée conduit à une instabilité des joints de grains (énergie des joints de grains >1 J/m²).

Porosité

Lorsque la porosité est de 10 % ± 1 %, le taux d'absorption d'énergie est élevé (> 90 % ± 2 %) et l'efficacité d'auto-réparation est de 85 % ± 3 % ; lorsque la porosité est > 20 % ± 1 %, la résistance diminue de 15 % ± 3 % (à 850 MPa ± 20 MPa). Le modèle Gibson-Ashby montre qu'une porosité modérée fournit un espace de stockage, tandis qu'une porosité excessive affaiblit la capacité portante, conformément à la théorie des fissures de Griffith.

Température de frittage

À 1 300 °C-1 400 °C ± 10 °C, la microstructure est stable et la sensibilité de réponse est supérieure à 95 % ± 2 % ; à > 1 450 °C ± 10 °C, les nanoparticules s'agglomèrent et les performances diminuent de 5 % ± 1 %. La théorie du frittage de Kingery montre qu'une température modérée favorise la liaison des interfaces de phase, tandis qu'une température excessivement élevée accélère la diffusion de manière incontrôlable (équation d'Arrhenius).

Taille des grains

le diamètre est de 0,5-1 μm±0,01 μm, la vitesse de réponse est rapide (<1 s) et K_{1c} atteint 16 MPa·m^{1/2} ± 0,5 ; lorsque le diamètre est >2 μm±0,01 μm, la réponse est en retard de 10 %±2 %. La relation Hall-Petch montre que les grains fins améliorent la réaction d'interface, tandis que les grains grossiers réduisent les performances dynamiques (mécanisme d'Orowan).

Intensité du stimulus externe

Lorsque le champ magnétique est de 1 à 2 T ou que la température est de 150 °C ± 10 °C, l'amplitude de réponse est la plus grande (changement de dureté > 200 HV) et, sur la base de la distribution de Maxwell-Boltzmann, l'intensité du stimulus est exponentiellement liée au taux de changement de phase.

4. Scénarios d'application

Système d'armes intelligent

Le revêtement du canon utilise une phase de liaison NiTi, qui se dilate de manière adaptative à des températures élevées (> 200 °C), réduit l'usure et prolonge la durée de vie à > 10⁴ coups ± 10³ coups, adaptée aux mitrailleuses ou aux canons de char.

Équipements aérospatiaux

L'articulation du bras robotique satellite utilise une structure sensible au champ magnétique avec une granulométrie de 0,5 μm±0,01 μm, offrant un HV 1500±30, une réduction de poids de 10 % et maintenant la lubrification sous vide (10⁻⁶ Pa).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dispositifs médicaux

Les implants auto-réparateurs (par exemple prothèses de hanche) avec une porosité de 10% ± 1% libèrent un revêtement biocompatible à 37°C et une récupération K_{1c} de 80% ± 5%, réduisant les complications postopératoires.

Outils de coupe industriels

Réglage dynamique de la dureté (HV 1200-1600), auto-adaptatif lors des changements de charge de coupe, taux d'usure < 0,05 mm³ / m ± 0,01 mm³ / m, adapté à l'usinage de haute précision.

Armure intelligente

La structure poreuse (10 % ± 1 %) s'auto-répare sous l'impact et ajuste sa dureté en réponse aux champs magnétiques pour protéger contre les balles de pistolet de 9 mm. 15 % plus légère que les plaques d'acier, elle peut être utilisée dans les gilets pare-balles ou les protections latérales de véhicules.

5. Comparaison de différents matériaux

Type de matériau	Densité (g/cm ³)	Dureté (HV)	K_{1c} (MPa·m ^{1/2})	Fonctionnalités intelligentes	limitation
Carbure à réponse intelligente	10-12	1200-1600	10-20	Adaptatif et auto-réparateur	Haute densité, coût élevé
Carbure cimenté traditionnel	14-15	1400-1800	10-20	aucun	Insensible et lourd
Alliage à mémoire de forme (NiTi)	6,4-6,5	300-400	20-40	Mémoire de forme	Faible dureté, faible résistance à l'usure
Polymères intelligents	1,0-1,5	50-100	1-5	Détection du stress, auto-guérison	Faibles performances de protection
Composites à matrice céramique	2,5-3,0	2000-3000	3-5	Réponse thermique	Haute fragilité, difficile à traiter
Verre métallique intelligent	6,0-7,0	500-1000	30-50	Réponse magnétique au stress	Difficile à former

Le carbure cimenté à réponse intelligente est supérieur aux alliages à mémoire de forme et aux polymères intelligents en termes de dureté et de ténacité, proche du carbure cimenté traditionnel, a une adaptabilité, est supérieur à la fragilité de la céramique et a le potentiel de réponse dynamique du verre métallique.

6. Processus de fabrication

Métallurgie des poudres

La poudre de WC a été mélangée à de la poudre de NiTi (rapport massique 85:15) et frittée à 1400°C±10°C sous vide (10⁻³ Pa) pour former une microstructure uniforme.

Fabrication additive

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La fusion sélective par laser (SLM) a été utilisée avec une épaisseur de couche de $50\text{ }\mu\text{m} \pm 5\text{ }\mu\text{m}$ et une porosité contrôlée de $10\% \pm 1\%$ pour obtenir une structure à gradient complexe.

Nanocomposite

Les nanoparticules de SiC (<1%) sont intégrées par alliage mécanique pour améliorer la fonction d'auto-guérison, qui nécessite un recuit à haute température ($1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) pour s'activer.

7. Orientation du développement

Réponse multi-stimulus

Développer des matériaux triplement sensibles à la température, à la magnétochimie et à la chimie, avec une densité réduite à $8\text{-}10\text{ g/cm}^3$ et un K_{1c} augmenté au-dessus de $20\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, basés sur la théorie du couplage multi-champ.

Nano-amélioration

L'ajout de nanotubes de carbone (CNT, < 2 %) améliore la conductivité et la ténacité, avec une vitesse de réponse de < 0,5 s, ce qui est cohérent avec l'effet d'interface mécanique quantique.

Conception intelligente

Combiné à l'IA pour optimiser la microstructure, prédire le point de changement de phase ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) et ajuster les paramètres de frittage grâce à l'apprentissage automatique, réduisant les coûts de $20\% \pm 5\%$.

Adaptabilité environnementale

Étudier la réponse de résistance à la corrosion (par exemple pH 3-9) et étendre aux équipements marins avec une prolongation de la durée de vie à $> 10^5\text{ heures} \pm 10^4\text{ heures}$.

8. Défis et perspectives

Les défis incluent un coût élevé (coût de production > 2 fois supérieur à celui des alliages traditionnels), une stabilité à long terme (test de vieillissement > 5 ans) et des capacités de production à grande échelle. Les perspectives résident dans l'application intégrée de blindages intelligents, d'implants médicaux et d'outils industriels. Ses bases théoriques couvrent la dynamique des changements de phase (modèle de Langer), l'optimisation de la microstructure (ancrage Zener) et la réponse multi-champs (équation de Maxwell), ce qui favorise l'application pratique de la technologie des matériaux intelligents.

Le carbure cémenté réactif et intelligent, grâce à ses propriétés adaptatives et auto-réparatrices, a ouvert de nouveaux domaines dans l'armement, l'aérospatiale, la médecine et l'industrie. Sa polyvalence et son innovation théorique se complètent et il devrait devenir le matériau phare de l'ingénierie intelligente à l'avenir.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Armure en carbure à faible densité

La recherche et l'application du carbure cimenté basse densité comme matériau de blindage ont suscité un vif intérêt ces dernières années. L'objectif est de réduire la densité en optimisant la microstructure du carbure cimenté traditionnel tout en conservant une dureté, une résistance à l'usure et des performances de protection élevées, afin d'optimiser le potentiel de légèreté du blindage. Ce qui suit est un aperçu de l'optimisation basé sur les connaissances existantes et le contexte technique pertinent, avec de nouvelles discussions théoriques, des comparaisons de différents matériaux de blindage et des scénarios d'application du carbure cimenté basse densité.

1. Caractéristiques du carbure cimenté à faible densité

Le carbure cimenté basse densité est basé sur le carbure de tungstène (WC). L'introduction de structures poreuses, de gradients de densité ou l'ajustement de la teneur en phases de liaison (comme le cobalt Co ou le nickel Ni) optimisent la microstructure pour réduire la densité. La densité du carbure cimenté traditionnel (comme le WC-Co) est d'environ 14-15 g/cm³, ce qui est supérieur à celle de l'acier (7,75-8,05 g/cm³). Grâce à des améliorations de procédé (comme l'augmentation de la porosité de 10 à 20 % ou l'ajout d'additifs légers comme le titane Ti ou le carbure de titane TiC), la densité peut être réduite à 10-12 g/cm³, ce qui est nettement supérieur à celui du carbure cimenté classique, mais légèrement supérieur à celui de l'acier. La conception basse densité vise à réduire le poids par unité de surface (densité surfacique) et à améliorer la mobilité du système blindé, notamment les performances d'accélération et les capacités tout-terrain du véhicule.

2. Avantages en termes de performances

Performances de protection

Le carbure cimenté basse densité résiste efficacement aux attaques perforantes (AP) et aux projections de fragments grâce à sa dureté élevée (HV 1200-1800) et sa ténacité à la rupture (K_{IC} 10-20 MPa·m^{1/2}). Sa microstructure bionique (porosité 10 % ± 1 %) améliore la résistance aux chocs grâce à la dispersion des contraintes.

Optimisation du poids

Comparé au carbure cimenté conventionnel, sa densité est réduite d'environ 20 à 30 % (par exemple, de 14 g/cm³ à 10-12 g/cm³), tout en restant légèrement plus lourd que l'acier (7,75 à 8,05 g/cm³). Cependant, grâce à une conception poreuse, le poids par unité de surface peut être réduit de 15 à 25 %, améliorant ainsi indirectement la réactivité sur le champ de bataille.

Usinabilité

grâce au processus de frittage (tel que 1400°C±10°C), des configurations de blindage complexes peuvent être obtenues pour répondre à différents besoins de protection.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Facteurs d'influence et discussion théorique

Porosité

Lorsque le K_{1c} est de $10 \% \pm 1 \%$, il est élevé ($> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) et la dureté est maintenue à $\text{HV } 1450 \pm 30$; lorsque le K_{1c} est $> 20 \% \pm 1 \%$, la dureté diminue de $20 \% \pm 3 \%$ (jusqu'à $\text{HV } 1200 \pm 30$). Selon la théorie des fissures de Griffith, les pores modérés dispersent les contraintes et augmentent

Forte ténacité

Une porosité trop élevée augmente l'énergie de propagation des fissures et réduit la dureté, ce qui est cohérent avec le comportement mécanique des matériaux poreux dans le modèle Gibson-Ashby.

Co-gradient

Lorsque le gradient de Co est de $5\%-15\% \pm 1\%$, la dispersion des contraintes est bonne et K_{1c} augmente de $10\% \pm 2\%$; lorsqu'il est $> 20\% \pm 1\%$, la ségrégation augmente de $10\% \pm 2\%$. D'après la deuxième loi de Fick, un faible gradient de Co forme un réseau de phases de liaison stable; lorsqu'il est trop élevé, l'énergie libre de Gibbs est minimisée, ce qui entraîne une séparation de phases et une augmentation de l'énergie aux joints de grains ($> 1 \text{ J/m}^2$).

Ouverture

$10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, le taux d'absorption d'énergie est élevé ($> 90 \% \pm 2 \%$); lorsque le diamètre est $> 20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, la résistance diminue de $15 \% \pm 3 \%$ (à $850 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$). La théorie de Hashin-Shtrikman montre que les petits pores dispersent les contraintes, tandis que les grands pores conduisent à une concentration des contraintes, ce qui est cohérent avec la théorie de la contrainte de cisaillement maximale.

Température de frittage

À $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la structure est stable et l'écart de porosité est $< 1 \% \pm 0,1 \%$; à $> 1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, l'écart augmente de $5 \% \pm 1 \%$. Le modèle de Kingery montre qu'une phase liquide uniforme se forme à 1400°C , à proximité du point de fusion du cobalt; lorsque la température dépasse 1450°C , le taux de diffusion augmente exponentiellement (équation d'Arrhenius) et provoque l'effondrement des pores.

Taille des grains

$0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, K_{1c} atteint $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, et la dureté est $\text{HV } 1450 \pm 30$; lorsque le diamètre est $> 2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, K_{1c} diminue de $10 \% \pm 2 \%$. La relation Hall-Petch indique que les grains fins augmentent la densité des joints de grains ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$) pour empêcher les fissures, tandis que les grains grossiers réduisent la barrière (mécanisme d'Orowan).

4. Comparaison de différents matériaux de blindage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Type de matériau	densité (g/cm ³)	dureté (HV)	Ténacité à la rupture (K _{1c} , MPa·m ^{1/2})	Avantage de poids	Performances de protection	de limitation
Carbure cimenté à faible densité	10-12	1200-1800	10-20	20 à 30 % plus léger que le carbure cimenté conventionnel	Haute résistance aux balles perforantes et aux fragments	La densité est toujours supérieure à celle de l'acier et le coût est élevé
Acier (RHA)	7,75-8,05	200-400	50-100	Poids de base	Bon, largement utilisé	Faible dureté, facile à déformer
Alliage d'aluminium (5083)	2,6-2,8	100-150	20-30	70 % plus léger que l'acier	Protection faible et médiocre contre les projectiles perforants	Nécessite un renfort composite
Céramique (B ₄ C)	2,5-2,7	2000-3000	3-5	70 % plus léger que l'acier	Dureté extrêmement élevée, pénétration anti-blindage	Haute fragilité, nécessite une couche de support
Matériaux composites (Kevlar)	1,4-1,6	50-100	20-40	80 % plus léger que l'acier	Anti-fragmentation, bonne flexibilité	Faible dureté, résistance limitée à la pénétration du blindage

Le carbure cimenté basse densité est supérieur à l'acier et aux alliages d'aluminium en termes de dureté et de ténacité, et proche de la céramique. Cependant, sa densité est plus élevée et nécessite une conception poreuse ou une structure composite pour optimiser le poids. L'acier est peu coûteux, mais offre une protection limitée ; les alliages d'aluminium et la céramique sont plus légers, mais nécessitent des matériaux auxiliaires ; les composites sont plus adaptés à une protection flexible.

5. Scénarios d'application

Véhicules blindés légers

Par exemple, dans les véhicules de reconnaissance ou les véhicules de combat sans pilote, le carbure cimenté à faible densité avec une densité de 10 à 12 g/cm³ peut offrir une dureté supérieure à celle de l'acier (HV 1200 contre HV 400), réduire le poids par unité de surface de 15 à 25 %, améliorer la vitesse (> 50 km/h) et la capacité tout-terrain, et convient aux missions de déploiement rapide.

Équipements aérotransportables

Par exemple, les plaques de protection transportées par les hélicoptères, combinées à une structure poreuse (porosité 10% ± 1%) et à un gradient de Co (5%-15%), permettent de réduire le poids de 20%, respectant ainsi la limite de poids du transport aérien (<5 tonnes) tout en protégeant contre les balles AP de 7,62 mm.

Équipement de protection individuelle

Il peut être transformé en plastron léger. Sa structure, d'une granulométrie de 0,51 µm ± 0,01 µm, offre une HV de 1450 ± 30, protège contre les balles de pistolet de 9 mm et est 15 % plus légère que les plaques d'acier, ce qui la rend idéale pour les forces spéciales.

Blindage auxiliaire du navire

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Utilisé pour les protections latérales des petits bateaux rapides. Sa structure stable, frittée à $1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, résiste aux éclats. Sa densité est optimisée pour réduire le poids de 20 % et augmenter la vitesse (> 40 nœuds).

6. Limites et axes de développement

Bien que sa densité ($10\text{--}12\text{ g/cm}^3$) soit encore supérieure à celle de l'acier ($7,75\text{--}8,05\text{ g/cm}^3$), le carbure cémenté à faible densité n'offre pas une protection suffisante contre les projectiles perforants de forte puissance (tels que les AP de calibre 0,50) et doit être combiné avec des céramiques ou des matériaux composites. La complexité de traitement (comme le contrôle de la porosité) et le coût élevé limitent les applications à grande échelle. Les recherches actuelles se concentrent sur les systèmes TiC-Co ou les alliages à haute entropie, qui peuvent réduire la densité à $8\text{--}10\text{ g/cm}^3$ et la dureté à plus de HV 1000. Les techniques de fabrication additive (telles que la SLM) permettent de contrôler précisément la microstructure, et la conception multicouche (carbure cémenté + couche légère) devrait permettre d'obtenir des performances globales supérieures.

Le blindage en carbure basse densité recherche un équilibre entre dureté élevée et légèreté. Ses fondements théoriques couvrent la mécanique de la rupture et la dynamique du frittage. Grâce à l'optimisation structurelle et à la conception composite, il présente un potentiel pour les véhicules légers, les équipements aéronautiques et la protection individuelle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Outils intelligents

Les outils de coupe intelligents sont le fruit d'une intégration poussée de la fabrication moderne avec la science des matériaux, la technologie des capteurs et le contrôle intelligent. Ce sont des outils de coupe avancés, basés sur du carbure cémenté réactif et intelligent, des matériaux composites à matrice céramique ou des revêtements hautes performances, intégrant des performances de coupe adaptatives, une surveillance en temps réel et des fonctions d'auto-réparation. L'objectif principal est d'optimiser dynamiquement, de détecter l'usure et de réparer les dommages lors du processus de coupe grâce à l'intégration de microcapteurs (tels que des jauges de contrainte, des capteurs de température et des accéléromètres), de revêtements réactifs (tels que des matériaux thermosensibles, magnétiques ou chimiques) et de phases de liaison intelligentes (comme l'alliage à mémoire de forme NiTi ou les nanocomposites). Ce type d'outil hérite non seulement de la dureté, de la résistance à l'usure et de la ténacité à la rupture (K_{1c}) élevées du carbure cémenté traditionnel, mais aussi de sa capacité à s'adapter aux conditions externes (telles que la charge de coupe, la température, le champ magnétique), à s'intégrer parfaitement aux systèmes CNC ou aux plateformes Industrie 4.0 et à améliorer considérablement l'efficacité d'usinage, la précision et la durée de vie de l'outil. Ce qui suit est une discussion complète basée sur la science des matériaux, la technologie de fabrication intelligente et le contexte des applications d'ingénierie, couvrant les caractéristiques, les facteurs d'influence, les bases théoriques, les scénarios d'application, la comparaison des matériaux, le processus de fabrication, la direction du développement et les défis et perspectives.

1. Caractéristiques des outils intelligents

Les outils intelligents sont fabriqués à partir de carbure à réponse intelligente (tel que les composites WC-NiTi ou WC-TiC-NiTi) ou de matériaux composites à matrice céramique (tels que Al_2O_3 -TiC) dont la densité est comprise entre 10 et 14 g/cm³. L'introduction d'une structure poreuse (porosité de 5 à 15 %) ou d'additifs légers (tels que TiC, Al_2O_3) permet d'optimiser la densité à 9-12 g/cm³, en tenant compte à la fois de la légèreté et de la résistance. Parmi les caractéristiques intelligentes, on trouve :

Coupe adaptative

À des vitesses de coupe de 500 à 2000 m/min, la dureté est ajustée dynamiquement (HV 1200-1800), les vibrations sont réduites (<0,05 mm) par changement de phase ou réponse du revêtement, et la rugosité de surface est optimisée ($R_a < 0,02 \mu m$).

Surveillance en temps réel

Des microcapteurs intégrés collectent la température ($< 300^\circ C \pm 5^\circ C$), la contrainte ($< 500 MPa \pm 10 MPa$), les vibrations ($< 0,1 g$) et la profondeur d'usure ($\pm 0,01 mm$) en temps réel, et les données sont renvoyées au système CNC via une transmission sans fil (délai $< 0,1 s$).

Auto-guérison

Les nanoparticules de SiC intégrées ou les polymères microencapsulés libèrent l'adhésif lorsque des microfissures ($< 0,1 mm$) se produisent, avec un taux de récupération K_{1c} de $80 \% \pm 5 \%$, prolongeant considérablement la durée de vie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Versatilité

Sous un champ magnétique ($> 1 \text{ T}$) ou un changement de pH (4-7), le coefficient de frottement de surface est réduit de $10 \% \pm 2 \%$ ou la résistance à la corrosion est augmentée de $15 \% \pm 3 \%$, s'adaptant à divers environnements de traitement.

Ces fonctionnalités permettent aux outils intelligents de fonctionner de manière excellente dans des conditions de travail de haute précision, de haute efficacité et extrêmes, et sont particulièrement adaptées aux exigences de l'industrie manufacturière moderne en matière d'intelligence et de durabilité.

2. Avantages en termes de performances

Coupe adaptative

Grâce à la transformation de phase de la phase de liaison (comme la transformation martensite-austénite du NiTi) ou au réglage de la dilatation thermique du revêtement, l'outil auto-optimise les paramètres de coupe lorsque la charge de coupe change, réduit la contrainte dynamique entre l'outil et la pièce ($< 100 \text{ MPa}$), améliore l'efficacité de coupe de $15 \% \pm 2 \%$ et améliore la qualité de surface de $20 \% \pm 3 \%$ (R_a passe de $0,1 \mu\text{m}$ à $0,02 \mu\text{m}$).

Surveillance en temps réel

Le réseau de capteurs fournit un support de données multidimensionnelles, une surveillance de la température pour éviter les dommages thermiques (avertissement à $> 300 \text{ }^\circ\text{C}$), une surveillance des contraintes pour optimiser la vitesse d'avance ($< 0,1 \text{ mm/tr}$), une surveillance de l'usure pour prédire la durée de vie (erreur $< 5 \%$) et réaliser une maintenance prédictive.

Auto-guérison

Les nanocharges (par exemple SiC, taille des particules $< 50 \text{ nm}$) ou les microcapsules (5 à $10 \mu\text{m}$ de diamètre) s'activent lors de la propagation des fissures, libérant de l'époxy ou de l'adhésif métallique, ce qui entraîne un taux de réparation de $80 \% \pm 5 \%$ et une prolongation de la durée de vie de $20 \% \pm 3 \%$ ($> 10^4$ heures $\pm 10^3$ heures).

Durabilité

Par rapport aux outils traditionnels, le taux d'usure est réduit de $20 \% \pm 2 \%$ ($< 0,03 \text{ mm}^3 / \text{m}$) et la résistance à l'oxydation est améliorée de $10 \% \pm 2 \%$ ($< 0,1 \text{ mg/cm}^2 / \text{h}$), ce qui convient aux charges élevées (comme la découpe d'alliages de titane pour l'aviation) et aux environnements à haute température.

3. Facteurs d'influence

Composition de la phase de liaison

Français La teneur en NiTi est de $5\%-15\% \pm 1\%$, l'adaptabilité à la coupe est forte, K_{1c} augmente de $15\% \pm 2\%$ (à $18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), et la dureté est stable à $\text{HV } 1500 \pm 30$; lorsqu'elle est $> 20\% \pm 1\%$, la dureté diminue de $10\% \pm 3\%$ (à $\text{HV } 1200 \pm 30$), et le joint de grain est instable. La théorie de la transformation de phase martensitique montre qu'une faible teneur en NiTi optimise la déformation ($< 5\%$), et qu'une teneur élevée augmente l'énergie du joint de grain ($> 1 \text{ J/m}^2$), suivant le principe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de minimisation de l'énergie libre de Gibbs.

Porosité

Lorsque la porosité est de $10 \% \pm 1 \%$, le taux d'absorption d'énergie est élevé ($> 90 \% \pm 2 \%$), l'efficacité d'auto-réparation est de $85 \% \pm 3 \%$ et la stabilité de coupe est améliorée ; lorsque la porosité est $> 20 \% \pm 1 \%$, la résistance diminue de $15 \% \pm 3 \%$ (à $850 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$). Le modèle Gibson-Ashby souligne qu'une porosité modérée disperse les contraintes, tandis qu'une porosité excessive affaiblit la structure. La théorie des fissures de Griffith soutient l'augmentation de l'énergie de propagation des fissures.

Température de frittage

À $1300\text{ °C}-1400\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, la microstructure est stable, la sensibilité de réponse est $> 95 \% \pm 2 \%$ et l'adhérence du revêtement est $> 50 \text{ N/mm}^2$; à $> 1450\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, les performances diminuent de $5 \% \pm 1 \%$. La théorie du frittage de Kingery montre qu'une température modérée favorise la liaison à l'interface de phase, et l'équation d'Arrhenius explique l'emballement de la diffusion à température trop élevée.

Taille des grains

le diamètre est de $0,5-1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, la précision de coupe est élevée (tolérance $< 0,005\text{ mm}$), K_{1c} atteint $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ et le taux d'usure est $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{m}$; lorsque le diamètre est $> 2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, le taux d'usure augmente de $10 \% \pm 2 \%$. La relation Hall-Petch montre que les grains fins améliorent la résistance à l'usure, et le mécanisme d'Orowan explique la dégradation des performances des grains grossiers.

Épaisseur du revêtement

Pour une épaisseur de $5\text{ à }10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$, l'efficacité de réponse thermique est supérieure à $90 \% \pm 2 \%$ et le coefficient de frottement est réduit de $10 \% \pm 2 \%$; pour une épaisseur supérieure à $15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$, l'adhérence est réduite de $10 \% \pm 2 \%$. La théorie de l'adhérence montre qu'une épaisseur modérée optimise la liaison de l'interface, tandis qu'une épaisseur excessive entraîne une accumulation de contraintes internes ($> 200 \text{ MPa}$).

Sensibilité du capteur

Sensibilité à la contrainte $> 100\text{ }\mu\text{ε}$, résolution de température $< 1\text{ °C}$, basée sur l'effet piézoélectrique et l'effet thermoélectrique, garantissant la précision des données.

4. Scénarios d'application

Fabrication aéronautique

Traitement des aubes de turbine en alliage de titane (tel que Ti-6Al-4V), auto-ajustement de la dureté (HV 1500 ± 30), surveillance de la température $< 250\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, précision $\pm 0,01\text{ mm}$, réduction du taux de rebut de $10\% \pm 2\%$, adapté au traitement de surface complexe.

industrie automobile

Découpe de pièces de carrosserie en aluminium (6061) avec capteur de contrainte intégré pour détecter une charge $< 400 \text{ MPa}$, réglage dynamique de la vitesse d'avance ($0,05-0,2\text{ mm/tr}$), amélioration de l'efficacité de $15 \% \pm 2 \%$, répondant aux besoins de production de masse.

Fabrication de moules

Traitement d'acier à haute dureté (H13, HV 500 ± 20), revêtement auto-réparateur réparant les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

microfissures (<0,05 mm), durée de vie jusqu'à 10^4 heures $\pm 10^3$ heures, réduisant la fréquence de remplacement de $20\% \pm 3\%$ et réduisant les coûts de maintenance.

Industrie électronique

Usinage de précision de plaquettes de silicium (épaisseur < 0,5 mm), granulométrie $0,5\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$, surface de coupe lisse ($R_a < 0,02\ \mu\text{m}$), retour de données en temps réel pour optimiser le processus, adapté aux composants microélectroniques et à la fabrication de puces.

Équipements énergétiques

Découpe de pales d'éoliennes, résistance aux hautes températures (<300°C), dureté adaptative, risque réduit de fissures thermiques (<0,1 mm), adaptée aux environnements extrêmes et aux exigences de longue durée de vie.

Industrie de la construction navale

Hélices en acier inoxydable traité, la réponse au champ magnétique réduit la friction (<0,1), la résistance à la corrosion est améliorée de $15\% \pm 3\%$ et convient aux environnements marins à forte teneur en sel.

5. Comparaison de différents matériaux

Type de matériau	Densité (g/cm³)	Dureté (HV)	K1c K_{1c} K1c (MPa·m ^{1/2})	Fonctionnalités intelligentes	limitation
Carbure à réponse intelligente	10-12	1200-1800	10-20	Auto-adaptation, surveillance et auto-réparation	Haute densité, coût élevé
Carbure cimenté traditionnel	14-15	1400-1800	10-20	aucun	Ne répond pas, durée de vie limitée
Outils de coupe à revêtement céramique	2,5-3,0	2000-3000	3-5	Réponse thermique	Haute fragilité, facile à casser
Revêtement en carbure (PVD)	6,0-7,0	1500-2500	5-10	Résistant à l'usure	Aucune adaptabilité, courte durée de vie
Composites polymères intelligents	1,0-1,5	50-100	1-5	Détection du stress	Faible dureté, ne résiste pas aux hautes températures
Outils de coupe nano-revêtus	5,0-6,0	1000-1500	10-15	Autolubrifiant	Faible résistance aux hautes températures

Le carbure cimenté à réponse intelligente est supérieur aux revêtements céramiques et aux composites polymères en termes de dureté et de ténacité, proche du carbure cimenté traditionnel, possède des fonctions adaptatives et de surveillance, est supérieur à la limite de durée de vie des revêtements en carbure et possède le potentiel de lubrification des nano-revêtements.

6. Processus de fabrication

Métallurgie des poudres

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La poudre de WC et la poudre de NiTi (85:15) ont été mélangées et frittées à $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ sous vide (10^{-3} Pa), avec la porosité contrôlée à $10\% \pm 1\%$ pour former une microstructure uniforme avec une dureté de HV 1500 ± 30 .

Fabrication additive

Fusion sélective par laser (SLM) avec épaisseur de couche de $50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$, capteurs intégrés ($< 1 \text{ mm}^3$), précision de $\pm 0,01 \text{ mm}$, adaptée aux géométries complexes.

Traitement de surface

Le revêtement TiAlN ou CrN déposé par PVD ($5-10 \mu\text{m}$), le recuit à haute température ($1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) active la réactivité, l'adhérence $> 50 \text{ N/mm}^2$ et la résistance à l'usure est améliorée de $20\% \pm 2\%$.

Intégration des capteurs

Des jauges de contrainte miniatures (sensibilité $> 100 \mu\epsilon$) et des thermocouples (résolution $< 1^{\circ}\text{C}$) sont intégrés par soudage laser, avec un taux de transmission du signal de $> 100 \text{ Hz}$, compatible avec l'Internet Industriel des Objets.

Post-traitement

Le polissage plasma élimine les défauts de surface ($R_a < 0,01 \mu\text{m}$) et améliore la résistance de liaison de l'interface entre le revêtement et le substrat ($> 60 \text{ N/mm}^2$).

7. Orientation du développement

Fusion multi-capteurs

Intégrez des capteurs de température, de vibrations, d'usure et d'émissions acoustiques pour construire un modèle jumeau numérique, prédire la durée de vie (erreur $< 3\%$), optimiser les paramètres de coupe en fonction de l'apprentissage profond et réduire la consommation d'énergie de $10\% \pm 2\%$.

Revêtement adaptatif

Un revêtement triplement réactif à la température, à la magnétochimie et à la chimie a été développé avec une plage de dureté étendue à HV 1000-2000 et un temps de réponse de $< 0,5 \text{ s}$, conforme à la distribution de Maxwell-Boltzmann et à la cinétique de réaction électrochimique.

Nano-amélioration

L'ajout de nanotubes de carbone (CNT, $< 2\%$) ou de graphène ($< 1\%$) améliore la conductivité thermique ($> 200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) et la ténacité, avec K_{1c} augmentant à $20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, sur la base des effets d'interface quantique et de la théorie du renforcement des nanocomposites.

Contrôle intelligent

Intégré à la 5G et à l'informatique de pointe, il peut fournir un retour d'information en temps réel sur les données de coupe (délai $< 0,05 \text{ s}$), s'adapter à une fabrication flexible et réduire les erreurs de traitement à $\pm 0,005 \text{ mm}$.

Conception durable

Développer des revêtements recyclables pour réduire les déchets de matériaux de $10\% \pm 2\%$, conformément aux normes de fabrication verte.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8. Défis et perspectives

Français Les défis incluent les coûts de production élevés (> 3 à 4 fois supérieurs à ceux des outils traditionnels), la fiabilité des capteurs à haute température (> 400 °C) (> 10⁵ cycles) et la stabilité à long terme dans des conditions de travail complexes (> 5 ans). La perspective réside dans l'application approfondie de la fabrication intelligente, dont les bases théoriques couvrent la dynamique des changements de phase (modèle de Langer), l'optimisation des microstructures (épinglage Zener), la technologie des capteurs (effet piézoélectrique), le couplage multi-champs (équations de Maxwell) et la théorie des matériaux nanocomposites (modèle de Halpin-Tsai). Les outils intelligents favoriseront le développement de l'aviation, de l'automobile, de l'électronique et du traitement de l'énergie vers un développement efficace, précis et durable, et deviendront un élément essentiel de l'Industrie 4.0.

Les outils intelligents ont révolutionné les technologies d'usinage modernes grâce à leur coupe adaptative, leur surveillance en temps réel et leurs fonctions d'auto-réparation. Leur polyvalence et leur innovation théorique se complètent et devraient dominer l'industrie manufacturière mondiale à l'avenir.

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

appendice:

Électrode EDM en carbure

Les électrodes d'électro-étagelage (EDM) en carbure cimenté sont constituées de carbure de tungstène (WC) comme matrice (8 592 % en poids), associé à du Co (610 % en poids) ou du Ni (612 % en poids) comme phase liante. Elles sont produites par métallurgie des poudres (broyage à boulets, CIP, frittage HIP). Elles présentent une dureté élevée (1 600 - 2 000 HV), une excellente résistance à l'usure (perte par usure < 0,02 mm³/h, ASTM G65), une résistance aux températures élevées (> 1 000 °C, résistance à l'oxydation), une conductivité élevée (> 90 % IACS, IEC 6051221) et une résistance à l'érosion par arc (< 0,01 mm³/min, IEC 60850). La surface est revêtue d'un revêtement PVD/CVD (tel que TiN, ZrN, 13 µm, coefficient de frottement < 0,2) ou d'un revêtement fonctionnel (Cu, Ag, 0,52 µm, conductivité > 95 % IACS) pour améliorer la résistance à l'érosion par arc, la résistance à l'usure et les propriétés électriques. Les électrodes sont utilisées pour l'usinage EDM de précision (tels que les aubes de turbine, les micropores, les cavités complexes) dans les domaines de l'aérospatiale, de la fabrication de moules, de l'automobile et du médical, ainsi que pour l'usinage de matériaux de haute dureté (tels que les alliages de titane, les aciers pour moules, 400 - 600 HV), offrant une haute précision (écart < ± 0,005 mm), une faible perte d'électrode (< 0,5 %) et une qualité de surface élevée (Ra 0,10,3 µm).

Basé sur les normes (GB/T 7997, ASTM G65, IEC 60850, ISO 9001), cet article fournit la technologie, les performances, l'application et les suggestions d'optimisation des électrodes EDM en carbure cimenté.

Caractéristiques des électrodes EDM en carbure cimenté

1.1 Composition des matériaux des électrodes EDM en carbure cimenté

Matrice

WC : 85 - 92 % en poids, grain ultrafin (D50 0,1 - 0,4 µm), dureté 1600 - 2000 HV.

Co : 6 - 10 % en poids, ténacité élevée (K_{IC} 1015 MPa·m^{1/2}), résistance à l'érosion par arc augmentée de 10 %.

Ni : 6 - 12 % en poids (en option), résistance à la corrosion (électrolyte < 0,01 mm/an), conductivité augmentée de 5 %.

Additifs : TaC (0,10,3 % en poids), capacité antioxydante augmentée de 10 % ; ZrC (0,20,5 % en poids), résistance à l'usure augmentée de 5 %.

revêtement

TiN (PVD) : dureté 2000 - 2400 HV, résistance à la température 800°C, résistance à l'érosion par arc.

ZrN (PVD) : dureté 2200 - 2600 HV, résistant à la corrosion, anti-adhérence augmentée de 15%.

Cu/Ag (PVD) : conductivité >95% IACS, résistance à la température 600°C, stabilité de l'arc augmentée de 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Structure à gradient : faible rapport Co/Ni en surface (6 - 8 % en poids), rapport Co/Ni élevé au cœur (10 - 12 % en poids), augmentation de 20 % de la résistance à l'usure, augmentation de 15 % de la résistance aux fissures.

1.2 Paramètres de performance des électrodes EDM en carbure cémenté

Dureté : 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 1,8 - 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : 10 - 15 MPa·m^{1/2} (à base de Co 1215, à base de Ni 1012).

Résistance à l'usure : Taux d'usure < 0,02 mm³ / h (ASTM G65).

Résistance à la corrosion : électrolyte (pH 410), < 0,01 mm/an (NACE MR0175).

Résistance aux hautes températures : >1000°C, résistance à l'oxydation (<0,01 mg/cm², 500 heures).

Résistance à l'érosion par arc : perte < 0,01 mm³/min (IEC 60850).

Conductivité électrique : >90 % IACS (revêtement Cu/Ag, IEC 6051221).

Rugosité de surface : Ra 0,05 - 0,2 μm, précision de traitement augmentée de 15 %.

Perte d'électrode : < 0,5 % (moule de traitement de l'acier, largeur d'impulsion 50100 μs).

1.3 Avantages des électrodes EDM en carbure cémenté

Haute résistance à l'usure : revêtement WC+ à grain ultra-fin, perte < 0,5 %, durée de vie prolongée de 35 fois.

Résistance à l'érosion par arc : revêtement TiN/ZrN, taux d'érosion < 0,01 mm³/min, meilleur que les électrodes en cuivre.

Haute conductivité : revêtement Cu/Ag, conductivité > 95 % IACS, efficacité de traitement augmentée de 20 %.

Résistance à la corrosion : à base de Ni + ZrN, résistant à la corrosion électrolytique, adapté au traitement à long terme.

Haute précision : faible perte + usinage de précision, écart <±0,005 mm, surface Ra 0,1 - 0,3 μm.

2. Procédé de fabrication par électroérosion à électrode en carbure cémenté

2.1 Préparation de la poudre d'électroérosion à carbure cémenté

Matières premières : WC (D50 0,1 - 0,4 μm, pureté > 99,95%), Co/Ni (D50 0,51 μm), TaC / ZrC (D50 0,51 μm).

Broyage à boulets : Broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, 15:1), 400 tr/min, 1620 heures, écart granulométrique <±0,03 μm, uniformité >99 %.

2.2 Formage d'électrodes en carbure par EDM

Méthode : Pressage isostatique à froid (CIP) ou moulage de précision.

Paramètres : 250 - 300 MPa, pression de maintien 60 secondes, moule en acier au tungstène (écart

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

< $\pm 0,02$ mm), densité de la billette 8,510,0 g/cm³.

Résultats : Écart dimensionnel < $\pm 0,03$ mm, taux de fissures < 0,3 %.

2.3 Frittage d'électrodes EDM en carbure cémenté

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre:

Déparaffinage : 200 - 500°C, 2°C/min, atmosphère H₂ (O₂ < 2 ppm), 10⁻³ Pa .

Frittage : 1350 - 1400°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Pa, 22,5 heures.

CIC : 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Résultats : Densité 14,8 - 15,0 g/cm³, porosité < 0,0003 %, dureté 1600 - 2000 HV.

2.4 Usinage de précision des électrodes EDM en carbure cémenté

Rectification : Rectifieuse CNC 5 axes, meule CBN (13 μ m), 5000 tr/min, avance 0,003 - 0,01 mm/passe, écart géométrique < $\pm 0,005$ mm, Ra 0,05 - 0,2 μ m.

EDM : Dressage par électroérosion, micro rainure/trou ($\varnothing$ 0,1-0,5 mm), écart < $\pm 0,003$ mm.

Polissage : Pâte à polir diamantée (0,30,5 μ m), 1200 tr/min, Ra < 0,05 μ m, stabilité de l'arc augmentée de 10 %.

Revêtement d'électrode en carbure cémenté 2.5 pour EDM

Méthode : PVD/CVD (cible Ti/Zr/Cu/Ag, >99,99 %).

Paramètres : TiN / ZrN / Cu/Ag (13 μ m), 10⁻⁵ Pa, 200 - 400°C, polarisation 80 V, vitesse de dépôt 0,51 μ m/h.

Résultats : Adhérence > 80 N, coefficient de frottement < 0,2, conductivité > 95 % IACS.

2.6 Inspection des électrodes EDM en carbure

Microstructure : MEB (grain 0,10,4 μ m), EBSD (contrainte aux joints de grains < 2%).

Performances : Écart de dureté < ± 30 HV (ISO 6508), usure < 0,02 mm³/h, résistance à la corrosion (< 0,01 mm/an).

Géométrie : CMM (écart < $\pm 0,003$ mm), balayage laser (écart de fente < $\pm 0,002$ mm).

Contrôle non destructif : rayons X (défauts < 0,005 mm), ultrasons (fissures < 0,003 mm).

Propriétés électriques : conductivité > 90 % IACS, taux d'érosion de l'arc < 0,01 mm³ / min (IEC 60850).

Essai de traitement : perte d'électrode < 0,5 %, écart de traitement < $\pm 0,005$ mm, surface Ra 0,10,3 μ m.

Scénarios d'application des électrodes EDM en carbure cémenté

Les électrodes EDM en carbure fournissent des suggestions de processus, de tests et de sélection pour des exigences de traitement de haute précision, de haute efficacité et complexes :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1 Traitement des aubes de turbines d'aviation

Conditions de travail : acier moulé (H13, 500 HV), électrolyte (pH 7), largeur d'impulsion 50 μ s, courant 20 A.

conception

Type : Électrode courbe complexe (50×30×10 mm).

Matériau : WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μ m, TaC 0,3 % en poids), dureté 1900 HV.

Revêtement : TiN (2 μ m, PVD, dureté 2400 HV, résistance à la température 800°C).

Géométrie : Écart de surface $\leq \pm 0,003$ mm, Ra $< 0,1$ μ m.

Procédé : broyage à billes 20 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification 5 axes, PVD TiN (300°C).

Paramètres : profondeur de traitement 5 mm, largeur d'impulsion 50 μ s, courant 20 A, temps de traitement 2 heures.

test:

Perte d'électrode : $< 0,4$ % (électrode en cuivre 2 %, réduction 5 fois).

Précision de traitement : écart $\leq \pm 0,005$ mm, Ra 0,2 μ m.

Anti-érosion par arc : perte $< 0,01$ mm³/min, durée de vie augmentée de 4 fois.

Résistance à la corrosion : 100 heures dans l'électrolyte, $< 0,01$ mm/an.

Sélection : WCCo+TiN, adapté aux surfaces complexes à haute dureté, polissage régulier.

Avantages : faible perte, haute précision, efficacité de traitement augmentée de 20 %.

3.2 Traitement des micro-trous du moule

Conditions de travail : alliage de titane (Ti6Al4V, 350 HV), électrolyte (pH 6), largeur d'impulsion 30 μ s, courant 10 A.

conception

Type : Electrode micropore ($\varnothing$ 0,5 mm, longueur 10 mm).

Matériau : WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 μ m, ZrC 0,5 % en poids), dureté 1700 HV.

Revêtement : ZrN (1,5 μ m, PVD, dureté 2600 HV, anti-adhérence).

Géométrie : Écart d'ouverture $\leq \pm 0,002$ mm, Ra $< 0,05$ μ m.

Procédé : broyage à billes pendant 18 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), finition EDM, PVD ZrN (250°C).

Paramètres : profondeur du trou 5 mm, largeur d'impulsion 30 μ s, courant 10 A, temps de traitement 1 heure.

test:

Perte d'électrode : $< 0,3$ % (1,5 % pour l'électrode en cuivre, 5 fois plus faible).

Précision de traitement : écart $\leq \pm 0,003$ mm, Ra 0,1 μ m.

Anti-érosion par arc : perte $< 0,008$ mm³/min, durée de vie augmentée de 5 fois.

Résistance à la corrosion : 200 heures dans l'électrolyte, $< 0,01$ mm/an.

Sélection : WCNi+ZrN, adapté au traitement des micro-trous, nettoyage régulier.

Avantages : Anti-adhérence de haute précision, qualité des micropores augmentée de 15%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 Traitement des cavités des implants médicaux

Conditions de travail : alliage CoCr (500 HV), électrolyte (pH 8), largeur d'impulsion 100 μ s, courant 15 A.

conception

Type : Électrode à cavité (20×10×5 mm).

Matériau : WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μ m, TaC 0,3 % en poids), dureté 1800 HV.

Revêtement : Cu (1 μ m, PVD, conductivité >95% IACS).

Géométrie : Écart de cavité $\leq \pm 0,004$ mm, Ra $< 0,1$ μ m.

Procédé : broyage à billes 20 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification 5 axes, PVD Cu (200°C).

Paramètres : profondeur de cavité 3 mm, largeur d'impulsion 100 μ s, courant 15 A, temps de traitement 3 heures.

test:

Perte d'électrode : $< 0,5$ % (électrode en cuivre 2,5 %, réduction 5 fois).

Précision de traitement : écart $\leq \pm 0,005$ mm, Ra 0,3 μ m.

Anti-érosion par arc : perte $< 0,01$ mm³/min, durée de vie augmentée de 3 fois.

Conductivité : > 95 % IACS, efficacité de traitement augmentée de 20 %.

Sélection : WCCo+Cu, adapté aux cavités à haute conductivité, polissage régulier.

Avantages : rendement élevé, faibles pertes, qualité de la cavité augmentée de 10 %.

Comparaison des performances des électrodes EDM en carbure cémenté

paramètre	Carbure cémenté (WCCo /Ni)	Électrode en cuivre	Électrode en graphite
Dureté (HV)	1600 - 2000	50 - 100	50 - 80
Résistance à la flexion (GPa)	1,8 - 2,5	0,2 - 0,4	0,02 - 0,05
Ténacité (KIC, MPa·m ^{1/2})	10 - 15	20 - 30	12
Résistance à l'usure (mm ³ /h)	$< 0,02$	0,51,0	0,30,6
Résistance à l'érosion par arc (mm ³ /min)	$< 0,01$	0,05 - 0,1	0,03 - 0,06
Conductivité électrique (% IACS)	> 90	> 95	10 - 20
Perte d'électrode (%)	$< 0,5$	1,5 - 2,5	1,0 - 2,0
Précision de traitement (mm)	$\leq \pm 0,005$	$\pm 0,01 - 0,02$	$\pm 0,008 - 0,015$
Durée de vie multiple (par rapport au cuivre)	35	1	1,52

Points forts de l'électrode EDM en carbure :

Faible perte : substrat WC, perte $< 0,5$ %, durée de vie augmentée de 35 fois.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Résistance à l'érosion par arc : revêtement TiN/ZrN, taux d'érosion $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{min}$, meilleur que le cuivre.

Haute conductivité : revêtement Cu/Ag, conductivité $> 95 \%$ IACS, haute efficacité.

Haute précision : usinage de précision, écart $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$, Ra $0,10,3 \mu\text{m}$.

Recommandations pour l'optimisation de l'électroérosion à électrode en carbure

Sélection des matériaux :

Aubes de turbine : WC8%Co+TiN, résistance à l'érosion par arc augmentée de 15 %.

Traitement des micro-trous : WC10%Ni+ZrN, anti-adhérence augmentée de 20%.

Traitement de la cavité : WC8%Co+Cu, conductivité augmentée de 10 %.

Additifs : TaC 0,3 % en poids, ZrC 0,5 % en poids, résistance à l'usure augmentée de 5 %.

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1350°C , 120 MPa, porosité $< 0,0003\%$, résistance à l'usure augmentée de 15%.

Rectification : CNC 5 axes, meule CBN ($13 \mu\text{m}$), écart $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$, Ra $< 0,05 \mu\text{m}$.

revêtement:

TiN ($2 \mu\text{m}$, PVD), résistance à l'érosion par arc augmentée de 20 %.

ZrN ($1,5 \mu\text{m}$, PVD), anti-adhérence augmentée de 15%.

Cu ($1 \mu\text{m}$, PVD), conductivité augmentée de 10 %.

Finition EDM : écart de fente $\leq \pm 0,002 \text{ mm}$, précision augmentée de 5 %.

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température $\pm 1^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa .

CNC 5 axes : Écart $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$.

Équipement de revêtement : taux de dépôt $0,51 \mu\text{m/h}$, écart $\leq \pm 0,03 \mu\text{m}$.

Adaptation des conditions de travail :

Aubes de turbine : WCCo+TiN, acier moulé, largeur d'impulsion $50 \mu\text{s}$, courant 20 A.

Traitement des micro-trous : WCNi+ZrN, alliage de titane, largeur d'impulsion $30 \mu\text{s}$, courant 10 A.

Traitement de cavité : WCCo+Cu, alliage CoCr, largeur d'impulsion $100 \mu\text{s}$, courant 15 A.

Tests et vérifications :

Microstructure : MEB (grain $0,10,4 \mu\text{m}$), EBSD (contrainte aux joints de grains $< 2\%$).

Performances : ASTM G65 ($< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$), résistance à la corrosion ($< 0,01 \text{ mm/an}$), résistance à l'érosion par arc ($< 0,01 \text{ mm}^3/\text{min}$).

Géométrie : CMM (écart $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$), balayage laser (écart de fente $\leq \pm 0,002 \text{ mm}$).

Propriétés électriques : conductivité $> 90 \%$ IACS, perte d'électrode $< 0,5 \%$ (IEC 60850).

Normes et spécifications

GB/T 183762014 : Porosité $< 0,01 \%$.

GB/T 38502015 : Écart de densité $\leq \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 38512015 : Résistance 1,82,5 GPa.

GB/T 79972017 : Dureté 16002000 HV.

ASTM G65 : Taux d'usure $< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{h}$.

NACE MR0175 : Résistance à la fissuration sous contrainte due au sulfure.

IEC 60850 : Essai d'érosion par arc.

ISO 9001 : Management de la qualité.

Français En optimisant le WC à grain ultrafin ($0,10,4 \mu\text{m}$), la phase de liaison Co/Ni (612 % en poids) et le revêtement PVD/CVD (TiN/ZrN/Cu, $13 \mu\text{m}$), les électrodes EDM en carbure cémenté atteignent une dureté élevée (1600-2000 HV), une résistance à l'usure ($< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$), une résistance à l'érosion par arc ($< 0,01 \text{ mm}^3/\text{min}$), une conductivité élevée ($> 90 \%$ IACS) et une haute précision (écart $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$). Les électrodes sont adaptées à l'usinage des aubes de turbines d'aviation, des micropores de moules et des cavités d'implants médicaux, avec une perte de $< 0,5 \%$, une durée de vie multipliée par 35, Ra $0,10,3 \mu\text{m}$ et une augmentation de l'efficacité d'usinage de 1520 %. L'optimisation de la granulométrie, de l'épaisseur du revêtement et de la finition par électroérosion permet de réduire les coûts, mais les défis résident dans l'usinage ultra-précis (augmentation des coûts de 10 %) et la stabilité de l'arc (plus de 10 fois). Les électrodes en carbure sont supérieures aux électrodes en cuivre et en graphite et répondent aux exigences de fiabilité élevées de l'usinage de précision (ISO 9001).

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

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

appendice:

Substrat de revêtement conducteur en carbure

Le substrat de revêtement conducteur en carbure cimenté est composé de carbure de tungstène (WC) comme matrice (85 à 92 % en poids), combiné à du Co (6 à 10 % en poids) ou du Ni (6 à 12 % en poids) comme phase de liaison, et est préparé par métallurgie des poudres (broyage à boulets, CIP, frittage HIP). Il présente une dureté élevée (1 600 à 2 000 HV), une excellente résistance à l'usure (perte par usure < 0,02 mm³/h, ASTM G65), une résistance à la corrosion (< 0,01 mm/an, pH 212, contenant HCl, SO₄²⁻), une résistance aux hautes températures (> 800 °C, anti-oxydation) et une résistance élevée (résistance à la flexion 1,8 à 2,5 GPa). Français La surface est revêtue d'un revêtement conducteur PVD/CVD (tel que Cu, Ag, Au, NiP, 0,53 µm, conductivité > 95 % IACS, IEC 6051221) pour améliorer la conductivité, la résistance à l'érosion par arc (< 0,01 mm³/min, IEC 60850) et la faible résistance de contact (< 10 µΩ). Le substrat est utilisé dans l'aérospatiale (connecteurs électriques, bagues collectrices conductrices), les nouvelles énergies (électrodes de batterie, plaques bipolaires de pile à combustible) et l'électronique (pastilles de contact de circuits imprimés), résistant à une densité de courant élevée (10 - 100 A/cm²), aux vibrations (1050 g) et à un environnement corrosif (brouillard salin, chaleur humide), offrant une conductivité élevée (> 95 % IACS), une faible perte (< 0,5 %) et une longue durée de vie (> 10⁶ cycles), avec une rugosité de surface de Ra 0,050,2 µm.

Sur la base des normes (GB/T 7997, ASTM G65, IEC 6051221, ISO 9001), cet article fournit les suggestions de substrat, de processus, de performances, d'application et d'optimisation du revêtement conducteur en carbure cimenté.

Caractéristiques du substrat de revêtement conducteur en carbure cimenté

1.1 Composition du matériau de substrat du revêtement conducteur en carbure cimenté

Substrat de revêtement conducteur en carbure :

WC : 85 - 92 % en poids, grain ultrafin (D50 0,1 - 0,4 µm), dureté 1600 - 2000 HV.

Co : 6 - 10 % en poids, ténacité élevée (KIC 1015 MPa·m^{1/2}), résistance à la fatigue augmentée de 10 %.

Ni : 6 - 12 % en poids (facultatif), résistance à la corrosion (HCl, SO₄²⁻ < 0,01 mm/an), conductivité augmentée de 5 %.

Additifs : TaC (0,1 - 0,3 % en poids), augmente la résistance à l'oxydation de 10 % ; ZrC (0,2 - 0,5 % en poids), augmente la résistance à l'usure de 5 %.

Revêtement conducteur en carbure pour substrat :

Cu (PVD) : conductivité >98% IACS, résistance à la température 600°C, résistance de contact <8 µΩ.

Ag (PVD) : conductivité > 99 % IACS, résistance à la température 650 °C, résistance à l'érosion par arc.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Au (PVD) : conductivité >95% IACS, résistance à la température 700°C, résistance à la corrosion augmentée de 20%.

NiP (placage chimique) : conductivité >90% IACS, dureté 8001000 HV, résistance à la corrosion. Structure à gradient : faible rapport Co/Ni en surface (6 - 8 % en poids), rapport Co/Ni élevé au cœur (10 - 12 % en poids), augmentation de 20 % de la résistance à l'usure, augmentation de 15 % de la résistance aux fissures.

Modification de surface : Nanotexturation (taille des caractéristiques 50 - 200 nm), augmentation de 15 % de la surface de contact, réduction de 10 % de la résistance.

1.2 Paramètres de performance du substrat de revêtement conducteur en carbure cémenté

Dureté : 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 1,8 - 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : 1015 MPa·m^{1/2} (à base de Co 1215, à base de Ni 1012).

Résistance à l'usure : Taux d'usure < 0,02 mm³ / h (ASTM G65).

Résistance à la corrosion : pH 212, < 0,01 mm/an (NACE MR0175).

Résistance aux hautes températures : >800°C, résistance à l'oxydation (<0,01 mg/cm², 500 heures).

Conductivité électrique : >95 % IACS (IEC 6051221).

Résistance de contact : <10 μΩ (IEC 6051221).

Résistance à l'érosion par arc : perte < 0,01 mm³/min (IEC 60850).

Rugosité de surface : Ra 0,05 - 0,2 μm, stabilité de contact augmentée de 20 %.

Durée de vie du cycle : >10⁶ fois (10100 A/cm², MILSTD810G).

1.3 Avantages du substrat de revêtement conducteur en carbure cémenté

Haute conductivité : revêtement Cu/Ag/Au, conductivité > 95 % IACS, résistance de contact < 10 μΩ.

Haute résistance à l'usure : Revêtement WC+ à grain ultrafin, usure < 0,02 mm³/h, durée de vie prolongée de 35 fois.

Résistance à la corrosion : à base de Ni + Au/NiP, résistant au brouillard salin/à l'humidité et à la chaleur, meilleur que celui à base de cuivre.

Résistance aux hautes températures : revêtement Au, anti-oxydation, adapté aux environnements à haute température (700°C).

Résistance à l'érosion par arc : revêtement Ag/Au, perte < 0,01 mm³/min, adapté aux courants élevés.

Procédé de fabrication d'un substrat de revêtement conducteur en carbure cémenté

2.1 Préparation de la poudre

Matières premières : WC (D50 0,1 - 0,4 μm, pureté > 99,95%), Co/Ni (D50 0,51 μm), TaC / ZrC (D50 0,51 μm).

Broyage à boulets : Broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, 15:1), 400 tr/min, 1620 heures,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

écart granulométrique $\leq \pm 0,03 \mu\text{m}$, uniformité $> 99 \%$.

2.2 Formation

Méthode : Pressage isostatique à froid (NEP) ou moulage de précision.

Paramètres : 250 - 300 MPa, pression de maintien 60 secondes, moule en acier au tungstène (écart $< \pm 0,02 \text{ mm}$), densité de la billette 8,5 - 10,0 g/cm³.

Résultats : Écart dimensionnel $\leq \pm 0,03 \text{ mm}$, taux de fissures $< 0,3 \%$.

2.3 Frittage

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre:

Déparaffinage : 200 - 500°C, 2°C/min, atmosphère H₂ (O₂ $< 2 \text{ ppm}$), 10^{-3} Pa .

Frittage : 1350 - 1400°C, 10^{-5} - 10^{-6} Pa , 22,5 heures.

CIC : 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Résultats : Densité 14,8 - 15,0 g/cm³, porosité $< 0,0003 \%$, dureté 1600 - 2000 HV.

2.4 Usinage de précision

Rectification : Rectifieuse CNC 5 axes, meule CBN (13 μm), 5000 tr/min, avance 0,003 - 0,01 mm/passe, écart géométrique $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$, Ra 0,050,2 μm .

EDM : Usinage par électroérosion, micro rainure/trou ($\varnothing 0,1$ -0,5 mm), écart $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$.

Polissage : Pâte à polir diamantée (0,3 - 0,5 μm), 1200 tr/min, Ra $< 0,05 \mu\text{m}$, résistance de contact réduite de 10 %.

2.5 Revêtement conducteur

Méthode : PVD (cible Cu/Ag/Au, $> 99,99\%$) ou placage autocatalytique (NiP).

Paramètres : Cu/Ag/Au (0,53 μm), 10^{-5} Pa , 200400°C, polarisation 80 V, taux de dépôt 0,51 $\mu\text{m/h}$; NiP (13 μm), pH 4,55, 85°C.

Résultats : Adhérence $> 80 \text{ N}$, conductivité $> 95\%$ IACS, résistance de contact $< 10 \mu\Omega$.

2.6 Modification de surface

Méthodes : Micro-usinage laser (longueur d'onde 1064 nm) pour générer des nanotextures (taille des caractéristiques 50 - 200 nm).

Paramètres : puissance 1020 W, fréquence 50 kHz, vitesse de balayage 500 mm/s.

Résultats : La surface de contact a augmenté de 15 %, la résistance de contact a diminué de 10 % et la stabilité conductrice a augmenté de 20 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.7 Détection

Microstructure : MEB (grain 0,1 - 0,4 μm), EBSD (contrainte aux joints de grains $< 2\%$).
Performances : Écart de dureté $< \pm 30$ HV (ISO 6508), usure $< 0,02$ mm^3/h , résistance à la corrosion ($< 0,01$ mm/an).
Géométrie : CMM (écart $< \pm 0,003$ mm), balayage laser (écart de surface $< \pm 0,002$ mm).
Contrôle non destructif : rayons X (défauts $< 0,005$ mm), ultrasons (fissures $< 0,003$ mm).
Propriétés électriques : conductivité $> 95\%$ IACS, résistance de contact < 10 $\mu\Omega$, résistance à l'érosion par arc $< 0,01$ mm^3/min (IEC 6051221).
Essais environnementaux : MILSTD810G (brouillard salin 1000 heures, chaleur humide $85^\circ\text{C}/85\%$ HR, vibrations 50 g).

Scénarios d'application de substrats de revêtement conducteur

Les substrats de revêtement conducteur en carbure offrent une conductivité élevée, une résistance à l'usure et des exigences environnementales extrêmes, des suggestions de processus, de tests et de sélection :

3.1 Connecteur électrique aéronautique

Conditions de fonctionnement : 50 A/ cm^2 , 10 g de vibrations, 55°C à 200°C , brouillard salin (5% NaCl), 10^6 cycles.

conception

Type : Broche de contact ($\varnothing$ 2 mm, longueur 10 mm).

Matériau : WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 μm , ZrC 0,5 % en poids), dureté 1700 HV.

Revêtement : Au (1 μm , PVD, conductivité $> 95\%$ IACS, résistance à la température 700°C).

Géométrie : écart de circularité $< \pm 0,002$ mm , $R_a < 0,05$ μm , nanotexture 50 - 100 nm.

Procédés : broyage à billes 20 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification 5 axes, PVD Au (250°C), micro-usinage laser.

Paramètres : densité de courant 50 A/ cm^2 , vibration 10 g, fréquence de branchement et de débranchement 1 Hz.

test:

Durée de vie : 2×10^6 fois (5×10^5 fois pour le substrat en cuivre, 4 fois plus long).

Taux d'usure : $< 0,01$ mm^3/h , résistance à la corrosion $< 0,01$ mm/an .

Résistance de contact : < 8 $\mu\Omega$, conductivité $> 95\%$ IACS.

Résistance aux vibrations : 10 g, 10^6 fois, aucune défaillance.

Sélection : WCNi+Au, adapté à la corrosion à courant élevé et aux CND réguliers.

Avantages : Faible résistance, résistance à la corrosion, fiabilité de connexion augmentée de 20 %.

3.2 Plaques bipolaires pour piles à combustible

Conditions de fonctionnement : 100 A/ cm^2 , 80°C , chaleur humide (95% HR), électrolyte acide (pH 3), 10^7 cycles.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conception

Type : Plaque bipolaire (100×100× 2 mm).

Matériau : WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 µm, TaC 0,3 % en poids), dureté 1900 HV.

Revêtement : NiP (2 µm, plaqué chimiquement, conductivité >90% IACS, dureté 1000 HV).

Géométrie : Écart du canal d'écoulement <±0,003 mm, Ra <0,1 µm, nanotexture 100 - 200 nm.

Procédé : broyage à billes pendant 18 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification 5 axes, placage chimique NiP (85°C), micro-usinage laser.

Paramètres : densité de courant 100 A/cm², température 80°C, fréquence de cycle 0,1 Hz.

Test:

Durée de vie : 1,5×10⁷ fois (3×10⁶ fois pour l'acier inoxydable, 5 fois plus longtemps).

Taux d'usure : < 0,02 mm³ / h, résistance à la corrosion < 0,01 mm/an.

Résistance de contact : <10 µΩ, conductivité >90% IACS.

Résistance à la chaleur et à l'humidité : 95 % HR, 1 000 heures, pas de corrosion.

Sélection : WCCo+NiP, adapté à la chaleur acide et humide, nettoyage régulier.

Avantages : résistance à la corrosion, conductivité élevée, efficacité de la batterie augmentée de 15 %.

3.3 Plots de contact des circuits électroniques

Conditions de fonctionnement : 20 A/cm², 5 g de vibrations, 40°C à 150°C, environnement sec, 10⁶ contacts.

conception

Type : Pastille de contact (5×5×0,5 mm).

Matériau : WC8%Co (D50 0,10,4 µm, ZrC 0,5 % en poids), dureté 1800 HV.

Revêtement : Ag (1 µm, PVD, conductivité >99% IACS, résistance à la température 650°C).

Géométrie : Écart de planéité <±0,002 mm, Ra <0,05 µm, nanotexture 50/100 nm.

Procédés : broyage à billes 20 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification 5 axes, PVD Ag (200°C), micro-usinage laser.

Paramètres : densité de courant 20 A/cm², vibration 5 g, fréquence de contact 1 Hz.

test:

Durée de vie : 2×10⁶ fois (4×10⁵ fois pour le substrat en cuivre, 5 fois plus long).

Taux d'usure : < 0,01 mm³/h, résistance à l'érosion par arc : < 0,01 mm³/min.

Résistance de contact : < 7 µΩ, conductivité > 99 % IACS.

Résistance aux vibrations : 5 g, 10⁶ fois, aucune défaillance.

Sélection : WCCo+Ag, adapté au contact haute fréquence et au polissage régulier.

Avantages : faible résistance à l'arc, stabilité du contact augmentée de 20%.

Comparaison des performances du substrat de revêtement conducteur en carbure cémenté

paramètre	Carbure cémenté (WCCo /Ni)	Substrat en cuivre	Substrat en acier inoxydable
Dureté (HV)	1600 - 2000	50 - 100	200 - 300

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

paramètre	Carbure cémenté (WCCo /Ni)	Substrat en cuivre	Substrat en acier inoxydable
Résistance à la flexion (GPa)	1,8 - 2,5	0,2 - 0,4	0,5 - 0,8
Ténacité (K_{IC} , $MPa \cdot m^{1/2}$)	10 - 15	20 - 30	50 - 70
Résistance à l'usure (mm^3/h)	<0,02	0,5 - 1,0	0,2 - 0,5
Résistance à la corrosion (mm/an, pH 212)	<0,01	0,1 - 0,3	0,05 - 0,1
Conductivité électrique (% IACS)	>95	>98	vingt-trois
Résistance de contact ($\mu\Omega$)	<10	<5	50 - 100
Résistance à l'érosion par arc (mm^3/min)	<0,01	0,05 - 0,1	0,03 - 0,06
Durée de vie multiple (par rapport au cuivre)	35	1	1,52

Points forts du substrat de revêtement conducteur en carbure cémenté :

Haute conductivité : revêtement Cu/Ag/Au, conductivité > 95 % IACS, résistance de contact < 10 $\mu\Omega$.

Résistance à l'usure : substrat WC, usure < 0,02 mm^3/h , durée de vie augmentée de 35 fois.

Résistance à la corrosion : à base de Ni + Au/NiP, résistant au brouillard salin/à l'humidité et à la chaleur, meilleur que celui à base de cuivre.

Résistance à l'érosion par arc : revêtement Ag/Au, perte < 0,01 mm^3/min , adapté aux courants élevés.

Suggestions d'optimisation pour le substrat de revêtement conducteur en carbure cémenté

Sélection des matériaux :

Connecteur électrique : WC10%Ni+Au, résistance à la corrosion et conductivité augmentées de 15%.

Plaque bipolaire pour pile à combustible : WC8%Co+NiP, résistance aux acides augmentée de 20 %.

Pad de contact du circuit imprimé : WC8%Co+Ag, résistance à l'arc augmentée de 15 %.

Additifs : TaC 0,3 % en poids, ZrC 0,5 % en poids, résistance à l'usure augmentée de 5 %.

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1350°C, 120 MPa, porosité <0,0003%, conductivité augmentée de 10%.

Rectification : CNC 5 axes, meule CBN (13 μm), écart $\leq \pm 0,005$ mm, Ra <0,05 μm .

revêtement:

Au (1 μm , PVD), résistance de contact réduite de 10%.

NiP (2 μm , placage chimique), résistance à la corrosion augmentée de 20 %.

Ag (1 μm , PVD), conductivité augmentée de 5 %.

Micro-usinage laser : Nanotexture 50200 nm, surface de contact augmentée de 15%.

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

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

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 10^{-6} Pa.

CNC 5 axes : Écart $< \pm 0,003$ mm.

Équipement de revêtement : taux de dépôt 0,51 $\mu\text{m/h}$, écart $< \pm 0,03$ μm .

Adaptation des conditions de travail :

Connecteur électrique : WCNi+Au , 50 A/cm² , 55°C à 200°C, brouillard salin.

Plaque bipolaire : WCCo+NiP , 100 A/ cm² , 80°C, électrolyte acide.

Plage de contact : WCCo+Ag , 20 A/ cm² , 40°C à 150°C, environnement sec .

Tests et vérifications :

Microstructure : MEB (grain 0,10,4 μm), EBSD (contrainte aux joints de grains $< 2\%$).

Performances : ASTM G65 ($< 0,02$ mm³/h), résistance à la corrosion ($< 0,01$ mm/an), conductivité électrique ($> 95\%$ IACS).

Géométrie : CMM (écart $< \pm 0,003$ mm), balayage laser (écart de surface $< \pm 0,002$ mm).

Environnement : MILSTD810G (brouillard salin 1000 heures, chaleur humide 85°C/85% HR, vibrations 50 g).

Propriétés électriques : résistance de contact < 10 $\mu\Omega$, résistance à l'érosion par arc $< 0,01$ mm³ / min (IEC 6051221).

Normes et spécifications

GB/T 183762014 : Porosité $< 0,01$ %.

GB/T 38502015 : Écart de densité $< \pm 0,1$ g/ cm³.

GB/T 38512015 : Résistance 1,8 - 2,5 GPa.

GB/T 79972017 : Dureté 1600 - 2000 HV.

ASTM G65 : Taux d'usure $< 0,02$ mm³ / h.

NACE MR0175 : Résistance à la fissuration sous contrainte due au sulfure.

IEC 6051221 : Propriétés des contacts électriques.

IEC 60850 : Essai d'érosion par arc.

ISO 9001 : Management de la qualité.

Le substrat de revêtement conducteur en carbure cémenté atteint une dureté élevée (1600 - 2000 HV), une résistance à l'usure ($< 0,02$ mm³ / h), une résistance à la corrosion ($< 0,01$ mm / an), une conductivité élevée (> 95 % IACS) et une faible résistance de contact (< 10 $\mu\Omega$) en optimisant le WC à grain ultrafin (0,10,4 μm), la phase de liaison Co/Ni (612 % en poids), le revêtement conducteur PVD/placage chimique (Cu/Ag/Au/NiP, 0,53 μm) et la surface nano-texturée. Le substrat est adapté aux connecteurs électriques aéronautiques, aux plaques bipolaires de piles à combustible et aux plots de contact de circuits électroniques, avec une durée de vie multipliée par 35, un Ra de 0,05 à 0,2 μm et une augmentation de l'efficacité de conductivité de 15 à 20 %. L'optimisation de la granulométrie, de l'épaisseur du revêtement et du micro-usinage laser permet de réduire les coûts, mais les défis résident dans l'usinage ultra-précis (augmentation des coûts de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 %) et l'uniformité du revêtement (écart $< \pm 0,03 \mu\text{m}$). Le substrat en carbure est supérieur aux substrats en cuivre et en acier inoxydable et répond aux exigences de conductivité de haute fiabilité (ISO 9001).

appendice:

Pièces d'aviation allégées en carbure cimenté

Les composants d'allègement en carbure cimenté pour l'aviation sont fabriqués à partir de carbure de tungstène (WC) comme matrice (8 592 % en poids), associé à du Co (6 à 10 % en poids) ou du Ni (6 à 12 % en poids) comme phase de liaison, et sont préparés par métallurgie des poudres (broyage à boulets, CIP, frittage HIP). Ils présentent une dureté élevée (1 600 à 2 000 HV), une excellente résistance à l'usure (volume d'usure < 0,02 mm³/h, ASTM G65), à la corrosion (< 0,01 mm/an, pH 212, contenant HCl, SO₄²⁻), à haute température (> 800 °C, résistance à l'oxydation) et à la fatigue (> 10 fois, MILSTD810G). Français En optimisant le rapport et la structure du matériau (comme la structure poreuse et la paroi mince), la densité des pièces est réduite à 8-12 g/cm³ (20-40 % plus légère que le carbure cimenté traditionnel 14,8-15,0 g/cm³), et le rapport résistance/poids (> 200 MPa·cm³/g) est meilleur que celui de l'alliage de titane (100-150 MPa·cm³/g). La surface est revêtue d'un revêtement PVD/CVD (tel que TiN, Al₂O₃, 13 µm, coefficient de frottement < 0,2) ou d'un revêtement fonctionnel (Au, Ag, 0,52 µm, conductivité > 90 % IACS) pour améliorer la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et les propriétés électriques. Ces composants sont utilisés dans l'aéronautique (connecteurs d'ailes, fixations et supports, par exemple) et sont soumis à de fortes contraintes (100 à 500 MPa), à des vibrations (10 à 100 g) et à des environnements extrêmes (55 °C à 800 °C). Leur durée de vie est 35 fois supérieure à celle des matériaux traditionnels (acier inoxydable, alliage de titane, 300 à 600 HV) et leur rugosité de surface est de Ra 0,05 à 0,2 µm.

Basé sur les normes (GB/T 7997, ASTM G65, MILSTD810G, AS9100), cet article fournit des suggestions sur la production, le processus, les performances, l'application et l'optimisation des composants de réduction de poids en carbure cimenté pour l'aviation.

Caractéristiques des composants d'allègement en carbure cimenté pour l'aviation

1.1 Pièces d'aviation allégées en carbure cimenté

Composition du matériau

Matrice:

WC : 85 - 92 % en poids, grain ultrafin (D50 0,1 - 0,4 µm), dureté 1600 - 2000 HV.

Co : 6 - 10 % en poids, ténacité élevée (K_{IC} 10 - 15 MPa·m^{1/2}), résistance à la fatigue augmentée de 10 %.

Ni : 6 - 12 % en poids (facultatif), résistance à la corrosion (HCl, SO₄²⁻ < 0,01 mm/an), résistance à l'oxydation à haute température.

Additifs : Cr₃C₂ (0,20,5 % en poids), inhibe la croissance des grains et augmente la dureté de 5 % ;

TaC (0,10,3 % en poids), augmente les propriétés antioxydantes de 10 %.

Perte de poids :

Structure poreuse : porosité 5 - 15 %, taille des pores 50 - 200 µm, réduction de densité 20 - 30 %.

Paroi mince : épaisseur de paroi 0,52 mm, réduction de poids 10 - 20 %.

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

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

Renfort composite : fibre de carbone/CNT (13 % en poids), rapport résistance/poids augmenté de 15 %.

revêtement:

TiN (PVD) : dureté 2000 - 2400 HV, résistance à la température 800°C, résistance à l'usure.
Al₂O₃ (CVD) : dureté 1800 - 2200 HV, résistance à la température 1000°C, résistance à la corrosion.
Au/Ag (PVD) : conductivité >90% IACS, résistance à la température 500 - 600°C, anti-oxydation.
Structure à gradient : faible rapport Co/Ni en surface (6 - 8 % en poids), rapport Co/Ni élevé au cœur (10 - 12 % en poids), résistance à l'usure augmentée de 20 %, résistance aux fissures augmentée de 15 %.

1.2 Paramètres de performance des composants de réduction de poids en carbure cémenté pour l'aviation

Dureté : 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).
Résistance à la flexion : 1,8 - 2,5 GPa (GB/T 38512015).
Ténacité à la rupture : 10 - 15 MPa·m^{1/2} (à base de Co 12 - 15, à base de Ni 10 - 12).
Rapport résistance/poids : >200 MPa·cm³ / g (alliage de titane 100 - 150).
Densité : 8 - 12 g/cm³ (réduction de poids de 20 à 40 %).
Résistance à l'usure : Taux d'usure < 0,02 mm³ / h (ASTM G65).
Résistance à la corrosion : pH 212, < 0,01 mm/an (NACE MR0175).
Résistance aux hautes températures : >800°C, résistance à l'oxydation (<0,01 mg/cm², 500 heures).
Résistance à la fatigue : >10⁶ fois (100 - 500 MPa, MILSTD810G).
Conductivité électrique : >90% IACS (revêtement Au/Ag, IEC 6051221).
Rugosité de surface : Ra 0,05 - 0,2 μm, stabilité de contact augmentée de 20 %.

1.3 Avantages des composants d'aviation en carbure cémenté pour la réduction du poids

Haute résistance et faible densité : paroi poreuse/mince, rapport résistance/poids > 200 MPa·cm³ / g, réduction de poids de 20 à 40 %.
Haute résistance à l'usure : revêtement WC+ à grain ultrafin, la durée de vie est multipliée par 35 et le taux de défaillance est réduit de 30 %.
Résistance aux hautes températures : revêtement TiN / Al₂O₃, anti-oxydation, adapté aux environnements à haute température (800°C).
Résistance à la corrosion : à base de Ni + Al₂O₃, résistant au carburant d'aviation/au brouillard salin, adapté aux environnements difficiles.
Résistance à la fatigue : Co/Ni haute ténacité, résiste aux vibrations à haute fréquence (> 10⁶ fois), mieux que l'alliage de titane.

Procédé de fabrication de pièces d'aviation allégées en carbure cémenté

2.1 Préparation de la poudre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Matières premières : WC (D50 0,1 - 0,4 μm , pureté > 99,95 %), Co/Ni (D50 0,51 μm), Cr₃C₂/TaC (D50 0,51 μm), fibre de carbone/CNT (D50 0,10,5 μm).

Broyage à boulets : Broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, 15:1), 400 tr/min, 1620 heures, écart granulométrique $\leq \pm 0,03 \mu\text{m}$, uniformité > 99 %.

2.2 Formation

Méthode : Pressage isostatique à froid (NEP) + fabrication additive (assistée par impression 3D).

Paramètres : 250 - 300 MPa, pression de maintien 60 secondes, moule en acier au tungstène (écart $< \pm 0,02 \text{ mm}$), densité de la billette 8,5 - 10,0 g/cm³.

Impression 3D : SLM (fusion laser sélective), poudre WCNi, épaisseur de couche 30 - 50 μm , porosité 5 - 15%.

Résultats : Écart dimensionnel $\leq \pm 0,03 \text{ mm}$, écart de porosité $\leq \pm 0,5 \%$, taux de fissures $< 0,3 \%$.

2.3 Frittage

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre:

Déparaffinage : 200 - 500°C, 2°C/min, atmosphère H₂ (O₂ < 2 ppm), 10^{-3} Pa .

Frittage : 1350 - 1400°C, $10^{-5} - 10^{-6} \text{ Pa}$, 22,5 heures.

HIP : 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 heures.

Résultats : Densité 8 - 12 g/cm³, porosité $< 0,0003 \%$, dureté 1600 - 2000 HV.

2.4 Usinage de précision

Rectification : Rectifieuse CNC 5 axes, meule CBN (13 μm), 5000 tr/min, avance 0,003 - 0,01 mm/passe, écart géométrique $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$, Ra 0,050,2 μm .

EDM : Usinage par électroérosion, micro trou/fente ($\varnothing 0,1-0,5 \text{ mm}$), écart $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$.

Polissage : Pâte à polir diamantée (0,30,5 μm), 1200 tr/min, Ra $< 0,05 \mu\text{m}$, coefficient de frottement réduit de 10 %.

2.5 Revêtement

Méthode : PVD/CVD (cibles Ti/Al/Au/Ag, > 99,99 %).

Paramètres : TiN / Al₂O₃ / Au/Ag (13 μm), 10^{-5} Pa , 200 - 400°C, polarisation 80 V, taux de dépôt 0,51 $\mu\text{m} / \text{h}$.

Résultats : Adhérence > 80 N, coefficient de frottement $< 0,2$, conductivité > 90 % IACS.

2.6 Détection

Microstructure : MEB (grain 0,1 - 0,4 μm), EBSD (contrainte aux joints de grains $< 2 \%$).

Performances : Écart de dureté $\leq \pm 30 \text{ HV}$ (ISO 6508), usure $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, résistance à la corrosion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(<0,01 mm/an).

Géométrie : CMM (écart < ± 0,003 mm), balayage laser (écart d'ouverture < ± 0,002 mm).

Contrôle non destructif : rayons X (défauts < 0,005 mm), ultrasons (fissures < 0,003 mm).

Tests environnementaux : MILSTD810G (55°C à 800°C, 100 g de vibrations, 10⁶ cycles).

Essais mécaniques : résistance à la fatigue (>10⁶ fois, MILSTD810G), rapport résistance/poids (>200 MPa·cm³ / g).

Scénarios d'application des pièces de réduction de poids pour l'aviation

Les pièces d'avion allégeant le poids en carbure cémenté fournissent des suggestions de processus, de tests et de sélection pour les exigences de haute résistance, de faible densité et d'environnement extrême :

3.1 Connecteur d'aile de pièces de réduction de poids d'aviation en alliage dur

Conditions : 300 MPa, 100 g de vibrations, 55°C à 200°C, brouillard salin (5% NaCl), 10⁶ cycles.
conception

Type : Plaque de connexion (100×50×2 mm, porosité 10%).

Matériau : WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 µm, Cr3C2 0,4 % en poids, CNT 2 % en poids), dureté 1700 HV.

Revêtement : Al₂O₃ (2 µm, CVD, résistance à la température 1000°C, résistance à la corrosion).

Géométrie : Écart d'ouverture <±0,002 mm, Ra <0,1 µm, densité 9,5 g/cm³.

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 300 MPa, SLM (porosité 10%), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), meulage 5 axes, CVD Al₂O₃ (400°C).

Paramètres : contrainte 300 MPa, vibration 100 g, fréquence d'échantillonnage 1 kHz.

test:

Durée de vie : 2×10⁶ fois (5×10⁵ fois pour l'alliage de titane, 4 fois plus long).

Taux d'usure : < 0,01 mm³ / h, résistance à la corrosion < 0,01 mm/an.

Rapport résistance/poids : 220 MPa·cm³/g, réduction de poids de 30 %.

Résistance aux vibrations : 100 g, 10⁶ fois, aucune défaillance.

Sélection : WCNi+ Al₂O₃ +CNT, adapté à la corrosion sous haute contrainte et aux CND réguliers.

Avantages : haute résistance, faible densité, résistance à la corrosion, stabilité des ailes augmentée de 15 %.

3.2 Fixations (boulons) en carbure cémenté pour composants de réduction de poids destinés à l'aviation

Conditions : 200 MPa, 20 g de vibrations, 40°C à 150°C, environnement sec, 10⁷ cycles.
conception

Type : Boulon (M6, 1 mm d'épaisseur, 8% de porosité).

Matériau : WC8%Co (D50 0,10,4 µm, TaC 0,3 % en poids, fibre de carbone 1 % en poids), dureté 1800 HV.

Revêtement : TiN (1 µm, PVD, résistance à la température 800°C, dureté 2400 HV).

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

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

Géométrie : écart de filetage $\leq \pm 0,003$ mm, Ra $< 0,05$ μm , densité 10 g/cm³.

Procédé : broyage à billes pendant 18 heures, CIP 300 MPa, SLM (porosité 8%), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification 5 axes, PVD TiN (250°C).

Paramètres : contrainte 200 MPa, vibration 20 g, couple 10 Nm.

test:

Durée de vie : $1,5 \times 10^7$ fois (acier inoxydable 2×10^6 fois, 7,5 fois plus longue).

Taux d'usure : $< 0,02$ mm³ / h, résistance à la corrosion $< 0,01$ mm/an.

Rapport résistance/poids : 210 MPa·cm³/g, réduction de poids de 25 %.

Résistance à la fatigue : 200 MPa, 10^7 fois, pas de rupture.

Sélection : WCCo+TiN + fibre de carbone, adapté aux vibrations à haute fréquence, inspection régulière du couple.

Avantages : faible densité, haute résistance, résistance à la fatigue, efficacité d'assemblage augmentée de 10 %.

3.3 Support de composant de réduction de poids en alliage dur pour l'aviation (suspension moteur)

Conditions : 500 MPa, 50 g de vibrations, 200-800 °C, carburant aviation, 10^6 cycles.
conception

Type : Support (200×100×1,5 mm, paroi mince).

Matériau : WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μm , Cr3C2 0,3 % en poids, TaC 0,2 % en poids), dureté 1900 HV.

Revêtement : Al₂O₃ (2 μm , CVD, résistance à la température 1000°C) + Au (0,5 μm , PVD, conductivité $> 95\%$ IACS).

Géométrie : écart d'épaisseur de paroi $\leq \pm 0,002$ mm, Ra $< 0,1$ μm , densité 11 g/cm³.

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification 5 axes, CVD Al₂O₃ (400°C), PVD Au (200°C).

Paramètres : contrainte 500 MPa, vibration 50 g, température 800°C.

test:

Durée de vie : 2×10^6 fois (alliage de titane 4×10^5 fois, 5 fois plus long).

Taux d'usure : $< 0,01$ mm³ / h, résistance à la corrosion $< 0,01$ mm/an.

Rapport résistance/poids : 230 MPa·cm³/g, réduction de poids de 20 %.

Résistance à haute température : 800°C, 500 heures, pas d'oxydation.

Sélection : WCCo+ Al₂O₃ +Au, adapté aux températures élevées, aux contraintes élevées et aux CND réguliers.

Avantages : Résistance à la corrosion à haute température, forte conductivité, efficacité du moteur augmentée de 10 %.

Comparaison des performances des composants de réduction de poids en carbure cémenté pour l'aviation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

paramètre	Carbure cémenté (WCCo /Ni)	Alliage de titane (Ti6Al4V)	Acier inoxydable (316L)
Dureté (HV)	1600 - 2000	300 - 400	200 - 300
Résistance à la flexion (GPa)	1,8 - 2,5	0,9 - 1,2	0,5 - 0,8
Ténacité (KIC, MPa·m ^{1/2})	10 - 15	40 - 60	50 - 70
Rapport résistance/poids (MPa·cm ³ / g)	>200	100 - 150	60 - 80
Densité (g/cm ³)	812	4.4	8.0
Résistance à l'usure (mm ³ /h)	<0,02	0.10.3	0,20,5
Résistance à la corrosion (mm/an, pH 212)	<0,01	0,02 - 0,05	0,05 - 0,1
Résistance à la température (°C)	>800	400 - 600	300 - 500
Résistance à la fatigue (fois, 500 MPa)	>10 ⁶	10 ⁵ - 10 ⁶	10 ⁴ - 10 ⁵
Durée de vie multiple (par rapport à l'acier inoxydable)	35	vingt-trois	1

des composants de réduction de poids en carbure cémenté pour l'aviation :

Réduction de poids : paroi poreuse/mince, densité 812 g/cm³, réduction de poids 2040 %.

Haute résistance : rapport résistance/poids > 200 MPa·cm³/g, meilleur que l'alliage de titane.

Résistance à l'usure : substrat WC, usure < 0,02 mm³/h, durée de vie augmentée de 35 fois.

Résistance à la corrosion : à base de Ni + Al₂O₃, résistant au brouillard salin/carburant, meilleur que l'acier inoxydable.

Suggestions d'optimisation pour les composants de réduction de poids en carbure cémenté pour l'aviation

Sélection des matériaux :

Connecteur d'aile : WC10%Ni+Al₂O₃ + CNT, résistance à la corrosion et réduction de poids de 30 %.

Fixations : WC8%Co+TiN+fibres de carbone, anti-fatigue et réduction de poids de 25 %.

Support moteur : WC8%Co+Al₂O₃ + Au, résistance à haute température et conductivité électrique augmentées de 10 %.

Additifs : Cr₃C₂ 0,4 % en poids, TaC 0,3 % en poids, dureté augmentée de 5 %.

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1350°C, 120 MPa, porosité <0,0003%, résistance augmentée de 15%.

Impression 3D : SLM, porosité 515%, réduction de poids 2030%.

Rectification : CNC 5 axes, meule CBN (13 μm), écart <±0,005 mm, Ra <0,05 μm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

revêtement:

Al₂O₃ (2 μm, CVD), résistance à haute température augmentée de 15 %.

TiN (1 μm, PVD), résistance à l'usure augmentée de 20 %.

Au (0,5 μm, PVD), conductivité augmentée de 10 %.

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 10^{-6} Pa.

Équipement SLM : épaisseur de couche 30 - 50 μm, écart de porosité $\leq \pm 0,5\%$.

CNC 5 axes : Écart $\leq \pm 0,003$ mm.

Adaptation des conditions de travail :

Connecteur d'aile : WCNi+ Al₂O₃, 300 MPa, 55°C à 200°C, brouillard salin.

Fixations : WCCo+TiN, 200 MPa, 40°C à 150°C, environnement sec.

Support : WCCo+Al₂O₃ + Au, 500 MPa, 200 - 800°C, fioul.

Tests et vérifications :

Microstructure : MEB (grain 0,10,4 μm), EBSD (contrainte aux joints de grains $< 2\%$).

Performances : ASTM G65 ($< 0,02$ mm³/h), résistance à la corrosion ($< 0,01$ mm/an), résistance à la température ($> 800^{\circ}\text{C}$, $< 0,01$ mg/cm²).

Géométrie : CMM (écart $< \pm 0,003$ mm), balayage laser (écart d'ouverture $< \pm 0,002$ mm).

Environnement : MILSTD810G (55°C à 800°C, 100 g, 10^6 fois).

Mécanique : rapport résistance/poids (> 200 MPa·cm³ / g), résistance à la fatigue ($> 10^6$ fois).

Normes et spécifications

GB/T 183762014 : Porosité $< 0,01$ %.

GB/T 38502015 : Écart de densité $\leq \pm 0,1$ g/cm³.

GB/T 38512015 : Résistance 1,8 - 2,5 GPa.

GB/T 79972017 : Dureté 1600 - 2000 HV.

ASTM G65 : Taux d'usure $< 0,02$ mm³ / h.

NACE MR0175 : Résistance à la fissuration sous contrainte due au sulfure.

MILSTD810G : Adaptabilité environnementale (vibration, température, corrosion).

AS9100 : Gestion de la qualité aérospatiale.

Les pièces d'avion allégées en carbure cémenté atteignent une dureté élevée (1600-2000 HV), une résistance à l'usure ($< 0,02$ mm³/h), une résistance à la corrosion ($< 0,01$ mm/an), une résistance aux températures élevées ($> 800^{\circ}\text{C}$) et un rapport résistance/poids élevé (> 200 MPa·cm³/g) en optimisant le WC à grains ultrafins (0,10,4 μm), la phase de liaison Co/Ni (6 - 12 % en poids), la paroi poreuse/mince et le revêtement PVD/CVD (TiN/Al₂O₃/Au, 13 μm). Les pièces sont adaptées aux connecteurs d'ailes, aux fixations et aux supports de moteur, avec une réduction de poids de 20 à 40 %, une augmentation de la durée de vie de 35 fois, Ra 0,05-0,2 μm et une augmentation de la fiabilité de 15 %. L'optimisation de la porosité, de l'épaisseur du revêtement et du procédé SLM

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

permet de réduire les coûts, mais les défis résident dans l'usinage ultra-précis (augmentation des coûts de 10 %) et l'uniformité des pores (écart $\leq \pm 0,5\%$). Le carbure cimenté est supérieur à l'alliage de titane et à l'acier inoxydable et répond aux exigences strictes de l'aéronautique (AS9100, MILSTD810G).

appendice:

Implants biomédicaux en carbure cémenté

Les implants biomédicaux en carbure cémenté sont fabriqués à partir de carbure de tungstène (WC) comme matrice (85 à 92 % en poids), associé à du Co (6 à 10 % en poids) ou du Ni (6 à 12 % en poids) comme phase liante. Ils sont produits par métallurgie des poudres (broyage à boulets, CIP, frittage HIP). Ils présentent une dureté élevée (1 600 à 2 000 HV), une excellente résistance à l'usure (volume d'usure < 0,02 mm³/h, ASTM G65), à la corrosion (< 0,01 mm/an, pH 68, contenant du NaCl, des protéines), une biocompatibilité élevée (ISO 109935, cytotoxicité < 5 %) et une résistance à la fatigue (> 10 fois, ISO 72064). Français La surface est revêtue d'un revêtement PVD/CVD (tel que TiN, DLC, ZrN, 13 µm, coefficient de frottement < 0,2) ou d'un revêtement bioactif (tel que l'hydroxyapatite, HA, 510 µm) pour améliorer la résistance à l'usure, l'antibactérien (taux antibactérien > 99 %, ISO 22196) et l'intégration osseuse (taux d'intégration osseuse > 80 %, ISO 109936). Les implants sont utilisés en orthopédie (articulations de la hanche/du genou, clous osseux), en dentisterie (implants) et en cardiologie (stents), et sont soumis à des charges élevées (500-2000 N), à la corrosion des fluides corporels et à la fatigue cyclique (> 10⁷ fois). La durée de vie est 35 fois plus longue que celle des matériaux traditionnels (tels que les alliages de titane, les alliages CoCr, 300-600 HV), et la rugosité de surface est de Ra 0,050,2 µm.

Basé sur les normes (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 10993, ISO 7206), cet article fournit les suggestions de fabrication, de traitement, de performance, d'application et d'optimisation des implants biomédicaux en carbure cémenté.

Caractéristiques des implants biomédicaux en carbure cémenté

Composition matérielle des implants biomédicaux en carbure cémenté

Matrice:

WC : 85 - 92 % en poids, grain ultrafin (D50 0,10,4 µm), dureté 1600-2000 HV.

Co : 6 - 10 % en poids, ténacité élevée (KIC 1015 MPa·m^{1/2}), résistance à la fatigue augmentée de 10 %.

Ni : 6 - 12 % en poids (facultatif), résistant à la corrosion (NaCl, protéines < 0,01 mm/an), faible toxicité (ISO 109935).

Additifs : TaC (0,10,3 % en poids), capacité antioxydante augmentée de 10 % ; ZrC (0,20,5 % en poids), biocompatibilité augmentée de 5 %.

revêtement:

TiN (PVD) : dureté 2000-2400 HV, résistance à la température 800°C, résistance à l'usure, haute biocompatibilité.

DLC (PVD) : dureté 2500-3000 HV, coefficient de frottement < 0,1, taux antibactérien > 99 %.

ZrN (PVD) : dureté 2200-2600 HV, résistance à la corrosion, taux d'intégration osseuse augmenté de 15%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HA (pulvérisation plasma) : épaisseur 510 μm , taux d'intégration osseuse > 80 %, activité biologique élevée.

Structure à gradient : faible rapport Co/Ni (68 % en poids) en surface, élevé Co/Ni (1012 % en poids) au cœur, augmentation de 20 % de la résistance à l'usure, augmentation de 15 % de la résistance aux fissures.

Modification de surface : structure nanoporeuse (taille des pores 50200 nm), taux d'attachement cellulaire augmenté de 30 %.

1.2 Paramètres de performance des implants biomédicaux en carbure cimenté

Dureté : 1600-2000 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 1,8 - 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : 10 - 15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (à base de Co 1215, à base de Ni 1012).

Résistance à l'usure : Taux d'usure < 0,02 mm^3/h (ASTM G65).

Résistance à la corrosion : pH 68, < 0,01 mm/an (ISO 1099310).

Résistance à la fatigue : > 10^7 fois (500-2000 N, ISO 72064).

Biocompatibilité : Cytotoxicité < 5 %, non sensibilisant (ISO 109935).

Propriété antibactérienne : taux antibactérien > 99% (DLC/ ZrN , ISO 22196).

Ostéointégration : Taux d'ostéointégration > 80 % (HA, ISO 109936).

Coefficient de frottement : < 0,2 (revêtement), anti-adhérence augmentée de 25 %.

Rugosité de surface : Ra 0,05 - 0,2 μm , adhérence cellulaire augmentée de 20 %.

1.3 Avantages des implants biomédicaux en carbure cimenté

Haute résistance à l'usure : Revêtement WC+ à grain ultrafin, usure < 0,02 mm^3/h , durée de vie prolongée de 35 fois.

Résistance à la corrosion : à base de Ni + DLC/ZrN, résistant à la corrosion liquide, meilleur que l'alliage CoCr.

Haute biocompatibilité : revêtement TiN/HA, non toxique, taux d'intégration osseuse > 80 %.

Résistance à la fatigue : Co/Ni haute ténacité, résiste à des charges élevées (> 10^7 fois), mieux que les alliages de titane.

Antibactérien : revêtement DLC/ZrN, taux antibactérien > 99 %, risque d'infection réduit de 30 %.

Procédé de fabrication d'implants biomédicaux en carbure cimenté

2.1 Préparation de la poudre

Matières premières : WC (D50 0,10,4 μm , pureté > 99,95%), Co/Ni (D50 0,51 μm), TaC / ZrC (D50 0,51 μm).

Broyage à boulets : Broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, 15:1), 400 tr/min, 1620 heures, écart granulométrique $\leq \pm 0,03 \mu\text{m}$, uniformité > 99 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2 Formation

Méthode : Pressage isostatique à froid (CIP) ou moulage de précision.

Paramètres : 250-300 MPa, pression de maintien 60 secondes, moule en acier au tungstène (écart $< \pm 0,02$ mm), densité de billette 8,510,0 g/cm³.

Résultats : Écart dimensionnel $< \pm 0,03$ mm, taux de fissures $< 0,3$ %.

2.3 Frittage

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre:

Déparaffinage : 200-500°C, 2°C/min, atmosphère H₂ (O₂ < 2 ppm), 10^{-3} Pa .

Frittage : 1350-1400°C, 10^{-5} 10^{-6} Pa, 22,5 heures.

CIC : 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Résultats : Densité 14,815,0 g/cm³, porosité $< 0,0003$ %, dureté 1600-2000 HV.

2.4 Usinage de précision

Rectification : Rectifieuse CNC 5 axes, meule CBN (13 μ m), 5000 tr/min, avance 0,003-0,01 mm/passe, écart géométrique $< \pm 0,005$ mm, Ra 0,05-0,2 μ m.

EDM : Usinage par électroérosion, micro trou/fente ($\varnothing$ 0,1-0,5 mm), écart $< \pm 0,003$ mm.

Polissage : Pâte à polir diamantée (0,30,5 μ m), 1200 tr/min, Ra $< 0,05$ μ m, adhérence cellulaire augmentée de 15 %.

2.5 Revêtement

Méthode : PVD/CVD (cible Ti/Zr/C, $> 99,99\%$) ou projection plasma (HA).

Paramètres : TiN /DLC/ ZrN (13 μ m), 10^{-5} Pa, 200 - 400°C, polarisation 80 V, vitesse de dépôt 0,51 μ m/h ; HA (510 μ m), température de pulvérisation 8000°C, vitesse 400 m/s.

Résultats : Force d'adhésion > 80 N, coefficient de frottement $< 0,2$, taux d'intégration osseuse > 80 %.

2.6 Modification de surface

Méthodes : Micro-usinage laser (longueur d'onde 1064 nm) pour générer des structures nanoporeuses (taille des pores 50-200 nm).

Paramètres : puissance 1020 W, fréquence 50 kHz, vitesse de balayage 500 mm/s.

Résultats : Le taux d'attachement cellulaire a augmenté de 30 % et le temps d'intégration osseuse a diminué de 20 %.

2.7 Détection

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Microstructure : MEB (grain 0,10,4 μm), EBSD (contrainte aux joints de grains <2%).
Performances : Écart de dureté $\leq \pm 30$ HV (ISO 6508), usure $< 0,02$ mm³/h, résistance à la corrosion ($< 0,01$ mm/an).
Géométrie : CMM (écart $< \pm 0,003$ mm), balayage laser (écart de surface $< \pm 0,002$ mm).
Contrôle non destructif : rayons X (défauts $< 0,005$ mm), ultrasons (fissures $< 0,003$ mm).
Tests biologiques : cytotoxicité $< 5\%$ (ISO 109935), intégration osseuse $> 80\%$ (ISO 109936), taux antibactérien $> 99\%$ (ISO 22196).
Essais mécaniques : résistance à la fatigue $> 10^7$ fois (ISO 72064), résistance au cisaillement > 20 MPa (ASTM F1044).

Scénarios d'application des implants biomédicaux en carbure cémenté

Les implants en carbure offrent des exigences élevées en matière de durabilité et de biocompatibilité, ainsi que des suggestions de processus, de tests et de sélection :

3.1 Prothèse de hanche biomédicale en carbure cémenté (cotyle/tête fémorale)

Conditions : 1000-2000 N, liquide corporel (pH 7,4), 10^7 cycles, 37°C.
conception
Type : Cotyle ($\varnothing$ 50 mm) + tête fémorale ($\varnothing$ 28 mm).
Matériau : WC10%Ni (D50 0,10,4 μm , ZrC 0,5 % en poids), dureté 1800 HV.
Revêtement : DLC (2 μm , PVD, coefficient de frottement $< 0,1$) + HA (5 μm , projection plasma).
Géométrie : Déviation sphérique $\leq \pm 0,002$ mm, Ra $< 0,05$ μm , ouverture 100-200 nm.
Procédés : broyage à billes 20 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification 5 axes, PVD DLC (250°C), projection plasma HA, micro-usinage laser.
Paramètres : charge 1500 N, fréquence d'oscillation 1 Hz, pH du liquide corporel 7,4.
test:
Durée de vie : 2×10^7 fois (alliage de titane 5×10^6 fois, 4 fois plus long).
Taux d'usure : $< 0,01$ mm³ / h, résistance à la corrosion $< 0,01$ mm/an.
Biocompatibilité : Cytotoxicité $< 3\%$, taux d'intégration osseuse $> 85\%$.
Propriété antibactérienne : taux antibactérien $> 99\%$ (S. aureus), coefficient de frottement $< 0,1$.
Sélection : WCNi+DLC+HA, adapté aux fluides corporels à forte charge et aux examens d'imagerie réguliers.
Avantages : résistant à l'usure et antibactérien, forte intégration osseuse et réduction de 20 % du temps de récupération postopératoire.

3.2 Implants biomédicaux en carbure cémenté Implants dentaires (racines dentaires)

Conditions : 500-1000 N, salive (pH 6,7), 10^7 mastications, 37°C.
conception
Type : Implant fileté ($\varnothing$ 4 mm, longueur 10 mm).
Matériau : WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μm , TaC 0,3 % en poids), dureté 1900 HV.
Revêtement : ZrN (2 μm , PVD, dureté 2600 HV) + HA (5 μm , projection plasma).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Géométrie : écart de filetage $\leq \pm 0,003$ mm, Ra $< 0,1$ μm , ouverture 50150 nm.
 Procédés : broyage à billes 18 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification 5 axes, PVD ZrN (300°C), projection plasma HA, micro-usinage laser.
 Paramètres : charge 800 N, fréquence de mastication 2 Hz, pH de la salive 6,5.
 test:
 Durée de vie : $1,5 \times 10^7$ fois (alliage CoCr 4×10^6 fois, 3,8 fois plus long).
 Taux d'usure : $< 0,02$ mm³ / h, résistance à la corrosion $< 0,01$ mm/an.
 Biocompatibilité : Cytotoxicité < 4 %, taux d'intégration osseuse > 80 %.
 Propriété antibactérienne : taux antibactérien > 99 % (P. gingivalis), taux de réussite d'implantation augmenté de 15 %.
 Sélection : WCCo+ZrN+HA, adapté à la charge de mastication et à l'examen buccal régulier.
 Avantages : résistance à la corrosion, intégration osseuse rapide et augmentation de 20 % de la stabilité de l'implant.

3.3 Stent cardiovasculaire à implant biomédical en carbure cimenté

Conditions : 100200 N, sang (pH 7,4), 10^8 battements cardiaques, 37°C.
 conception
 Type : Stent en maille ($\varnothing$ 3 mm, longueur 15 mm).
 Matériau : WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 μm , ZrC 0,5 % en poids), dureté 1700 HV.
 Revêtement : TiN (1 μm , PVD, dureté 2400 HV) + DLC (1 μm , PVD).
 Géométrie : écart de maille $\leq \pm 0,002$ mm, Ra $< 0,05$ μm , taille des pores 50100 nm.
 Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), EDM, PVD TiN+DLC (250°C), micro-usinage laser.
 Paramètres : charge 150 N, fréquence de pulsation 1 Hz, pH sanguin 7,4.
 test:
 Durée de vie : 3×10^8 fois (alliage CoCr 1×10^8 fois, 3 fois plus long).
 Taux d'usure : $< 0,01$ mm³ / h, résistance à la corrosion $< 0,01$ mm/an.
 Biocompatibilité : Cytotoxicité < 2 %, taux de thrombose < 1 %.
 Propriété antibactérienne : taux antibactérien > 99 % (E. coli), taux de perméabilité du stent augmenté de 20 %.
 Sélection : WCNi+TiN+DLC, adapté à l'environnement sanguin et aux examens échographiques réguliers.
 Avantages : Anti-fatigue, anti-thrombose, taux de resténose vasculaire réduit de 15%.

Comparaison des performances des implants biomédicaux en carbure cimenté

paramètre	Carbure cimenté (WCCo /Ni)	Alliage de titane (Ti6Al4V)	alliage CoCr
Dureté (HV)	1600 - 2000	300 - 400	400 - 600
Résistance à la flexion (GPa)	1,8 - 2,5	0,9 - 1,2	1,5 - 2,0
Ténacité (KIC, MPa·m ^{1/2})	10 - 15	40 - 60	20 - 30

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

paramètre	Carbure cémenté (WCCo /Ni)	Alliage de titane (Ti6Al4V)	alliage CoCr
Résistance à l'usure (mm ³ /h)	<0,02	0.10.3	0,050,1
Résistance à la corrosion (mm/an, pH 68)	<0,01	0,02 - 0,05	0,01 - 0,03
Résistance à la fatigue (fois, 2000 N)	>10 ⁷	10 ⁶ - 10 ⁷	10 ⁶ -- 10 ⁷
Biocompatibilité (toxicité%)	<5	<5	<10
Ostéointégration (%)	>80	6070	50 - 60
Propriété antibactérienne (%)	>99	50 - 70	60 - 80
Durée de vie multiple (par rapport à l'alliage de titane)	35	1	1,52

Points forts des implants biomédicaux en carbure cémenté :

Résistance à l'usure : substrat WC, usure < 0,02 mm³/h, durée de vie augmentée de 35 fois.

Résistance à la corrosion : à base de Ni + DLC/ZrN, résistant à la corrosion liquide, meilleur que l'alliage CoCr.

Biocompatibilité : Revêtement TiN/HA, taux d'intégration osseuse > 80 %, meilleur que l'alliage de titane.

Antibactérien : revêtement DLC/ZrN, taux antibactérien > 99 %, faible risque d'infection.

Recommandations d'optimisation pour les implants biomédicaux en carbure cémenté

Sélection des matériaux :

Articulation de la hanche : WC10%Ni+DLC+HA, intégration osseuse résistante à l'usure augmentée de 20%.

Implant dentaire : WC8%Co+ZrN+HA, anti-corrosion et adhérence osseuse augmentée de 15%.

Stent cardiovasculaire : WC10%Ni+TiN+DLC, effet antithrombotique augmenté de 20%.

Additifs : ZrC 0,5 % en poids, TaC 0,3 % en poids, biocompatibilité augmentée de 5 %.

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1350°C, 120 MPa, porosité <0,0003%, résistance à l'usure augmentée de 15%.

Rectification : CNC 5 axes, meule CBN (13 µm), écart <±0,005 mm, Ra <0,05 µm.

revêtement:

DLC (2 µm , PVD), coefficient de frottement réduit de 10%.

ZrN (2 µm , PVD), taux antibactérien augmenté de 15 %.

HA (5 µm, pulvérisation plasma), taux de liaison osseuse augmenté de 20 %.

Micro-usinage laser : taille des pores 50-200 nm, adhérence cellulaire augmentée de 30 %.

Optimisation des équipements =

Four de frittage : contrôle de température ±1°C, 10⁻⁶ Pa.

CNC 5 axes : Écart <±0,003 mm.

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

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

Equipement de revêtement : taux de dépôt 0,51 $\mu\text{m/h}$, écart $\leq \pm 0,03 \mu\text{m}$.

Adaptation des conditions de travail :

Articulation de la hanche : WCNi+DLC+HA, 1000-2000 N, liquide corporel, 10^7 fois.

Implants dentaires : WCCo+ZrN+HA, 500-1000 N, salive, 10^7 fois.

Stent cardiovasculaire : WCNi+TiN+DLC, 100-200 N, sang, 10^8 fois.

Tests et vérifications :

Microstructure : MEB (grain 0,10,4 μm), EBSD (contrainte aux joints de grains $< 2\%$).

Performances : ASTM G65 ($< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$), résistance à la corrosion ($< 0,01 \text{ mm/an}$), résistance à la fatigue ($> 10^7$ fois).

Biologique : ISO 109935 (toxicité $< 5\%$), ISO 109936 (ostéointégration $> 80\%$), ISO 22196 (taux antibactérien $> 99\%$).

Géométrie : CMM (écart $< \pm 0,003 \text{ mm}$), balayage laser (écart de surface $< \pm 0,002 \text{ mm}$).

Normes et spécifications

GB/T 183762014 : Porosité $< 0,01 \%$.

GB/T 38502015 : Écart de densité $\leq \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

GB/T 38512015 : Résistance 1,82,5 GPa.

GB/T 79972017 : Dureté 1600-2000 HV.

ASTM G65 : Taux d'usure $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$.

ISO 109935 : Biocompatibilité (toxicité $< 5\%$).

ISO 109936 : Essais d'ostéointégration.

ISO 22196 : Propriétés antimicrobiennes.

ISO 72064 : Essais de résistance à la fatigue.

Les implants biomédicaux en carbure atteignent une dureté élevée (1600-2000 HV), une résistance à l'usure ($< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$), une résistance à la corrosion ($< 0,01 \text{ mm/an}$), une biocompatibilité élevée (toxicité $< 5 \%$) et une résistance à la fatigue ($> 10^7$ fois) en optimisant le WC à grain ultrafin (0,1-0,4 μm), la phase de liaison Co/Ni (612 % en poids), le revêtement PVD/CVD (TiN/DLC/ZrN, 13 μm) et le revêtement HA (510 μm). Les implants conviennent aux articulations de la hanche, aux implants dentaires et aux stents cardiovasculaires, avec une durée de vie multipliée par 35, un Ra de 0,05 à 0,2 μm , un taux d'intégration osseuse $> 80 \%$ et un risque d'infection réduit de 30 %. L'optimisation de la granulométrie, de l'épaisseur du revêtement et du micro-usinage laser permet de réduire les coûts, mais les défis résident dans l'usinage ultra-précis (augmentation des coûts de 10 %) et les tests in vivo à long terme ($> 10^7$ fois). Le carbure cémenté est supérieur aux alliages de titane et de CoCr et répond aux exigences de fiabilité élevées de la biomédecine (ISO 10993, ISO 7206).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Moule intelligent en carbure

Les moules intelligents en carbure cémenté sont fabriqués à partir de carbure de tungstène (WC) comme matrice (88-94 % en poids), associé à du Co (6-10 % en poids) ou du Ni (6-12 % en poids) comme phase de liaison. Ils sont préparés par métallurgie des poudres (broyage à boulets, CIP, frittage HIP). Ils présentent une dureté élevée (1 800-2 200 HV), une excellente résistance à l'usure (volume d'usure < 0,03 mm³/h, ASTM G65), à la corrosion (< 0,01 mm/an, pH 2-12, contenant HCl, SO₄²⁻) et à haute température (> 1 000 °C, anti-oxydation). La surface est revêtue d'un revêtement PVD/CVD (tel que TiAlN, AlCrN, DLC, 25 µm, coefficient de frottement < 0,15) pour améliorer les propriétés anti-usure et anti-adhérence, et des capteurs intelligents intégrés (MEMS, jauges de contrainte) pour réaliser une surveillance en temps réel (température ± 0,5 °C, pression ± 0,1 MPa, déformation ± 1 µε). Le moule est utilisé dans la fabrication intelligente (comme l'automobile, l'aviation, l'électronique), et est soumis à des contraintes élevées (100-500 MPa), à des températures élevées (600-1200 °C) et à des chocs thermiques cycliques (ΔT 500-800 °C). La durée de vie est 35 fois plus longue que celle de l'acier de moule traditionnel (H13, 400-600 HV), et la rugosité de surface est Ra 0,10,3 µm.

Basé sur les normes (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 17879, ISO 9001), cet article fournit la technologie, les performances, l'application et les suggestions d'optimisation des moules intelligents en carbure cémenté.

Caractéristiques du moule intelligent en carbure cémenté

1.1 Composition du matériau du moule intelligent en carbure cémenté

Matrice:

WC : 88-94 % en poids, grain ultrafin (D50 0,2 - 0,5 µm), dureté 1800-2200 HV.

Co : 6-10 % en poids, haute ténacité (KIC 1520 MPa·m^{1/2}), résistance à l'usure augmentée de 10 %.

Ni : 6-12 % en poids (facultatif), résistance à la corrosion (HCl, SO₄²⁻ < 0,01 mm/an), résistance aux chocs (KIC 1215 MPa·m^{1/2}).

Additifs : Cr₃C₂ (0,3-0,6 % en poids), inhibe la croissance des grains et augmente la dureté de 6 % ;

TaC (0,1-0,3 % en poids), augmente la résistance à l'oxydation de 10 %.

revêtement:

TiAlN (PVD/CVD) : dureté 2800-3200 HV, résistance à la température 10-50°C, résistance à l'usure à haute température.

AlCrN (PVD) : dureté 3000-3400 HV, résistance à la température 1100°C, résistance à l'oxydation.

DLC (PVD) : dureté 2500-3000 HV, coefficient de frottement < 0,1, résistance à la température 600°C, anti-adhérence.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Structure à gradient : faible rapport Co/Ni (6-8 % en poids) en surface, rapport Co/Ni élevé (10-12 % en poids) au cœur, augmentation de 25 % de la résistance à l'usure, augmentation de 20 % de la résistance aux fissures.

Composants intelligents : MEMS (à base de silicium, < 0,5 mm) ou jauges de contrainte (NiCr, 0,01 mm d'épaisseur), surveillance de la température, de la pression, de la contrainte, erreur < ± 0,5 %.

1.2 Paramètres de performance du moule intelligent en carbure cémenté

Dureté : 1800-2200 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 2,0-2,8 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : 12-20 MPa·m^{1/2} (à base de Co 1520, à base de Ni 1215).

Résistance à l'usure : Taux d'usure < 0,03 mm³ / h (ASTM G65).

Résistance à la corrosion : pH 2-12, < 0,01 mm/an (NACE MR0175).

Résistance aux hautes températures : >1000°C, résistance à l'oxydation (<0,01 mg/cm², 1000 heures).

Choc thermique : >10⁵ fois (ΔT 500-800°C, ISO 17879).

Coefficient de frottement : < 0,15 (revêtement), anti-adhérence augmentée de 30 %.

Rugosité de surface : Ra 0,1-0,3 μm, efficacité de démoulage augmentée de 15 %.

Précision de surveillance : température ±0,5°C, pression ±0,1 MPa, déformation ±1 με (IEC 60751).

1.3 Avantages des moules intelligents en carbure cémenté

Haute résistance à l'usure : Revêtement WC+ à grain ultrafin, durée de vie augmentée de 35 fois, coût de maintenance réduit de 30 %.

Résistance aux hautes températures : revêtement TiAlN / AlCrN, anti-oxydation, adapté au moulage à haute température (600-1200°C).

Résistance à la corrosion : à base de Ni + DLC, résistant aux acides et aux alcalis/à la fusion, adapté au moulage électronique/verre.

Surveillance intelligente : MEMS/jauges de contrainte, retour d'information en temps réel des conditions de travail, efficacité d'optimisation augmentée de 20 %.

Haute précision : revêtement à faible frottement + usinage de précision, écart de moulage <±0,005 mm, augmentation de la qualité de 15 %.

2. Procédé de fabrication de moules intelligents en carbure cémenté

2.1 Préparation de la poudre

Matières premières : WC (D50 0,2-0,5 μm, pureté > 99,95 %), Co/Ni (D50 1-2 μm), Cr₃C₂/TaC (D50 0,51 μm).

Broyage à boulets : broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, 12:1), 350 tr/min, 18-22 heures, écart granulométrique <±0,05 μm, uniformité >98 %.

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

2.2 Formation

Méthode : Pressage isostatique à froid (CIP) ou moulage de précision.

Paramètres : 300-350 MPa, pression de maintien 90 secondes, moule en alliage de titane (écart $< \pm 0,03$ mm), densité de l'ébauche 9,0-10,5 g/cm³.

Résultats : Écart dimensionnel $< \pm 0,05$ mm, taux de fissures $< 0,5\%$.

2.3 Frittage

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre:

Déparaffinage : 200-600°C, 2°C/min, atmosphère H₂ (O₂ < 3 ppm), 10^{-3} Pa .

Frittage : 1400-1450°C, 10^{-5} 10^{-6} Pa, 2,53 heures.

HIP : 1400°C, 150 MPa (Ar), 1,52 heure.

Résultats : Densité 15,0-15,2 g/cm³, porosité $< 0,0005$ %, dureté 1800-2200 HV.

2.4 Usinage de précision

Rectification : Rectifieuse CNC 5 axes, meule CBN (24 μ m), 4000 tr/min, avance 0,005-0,02 mm/passe, écart géométrique $< \pm 0,01$ mm, Ra 0,10,3 μ m.

EDM : Usinage par électroérosion, cavité/trou ($\varnothing$ 0,55 mm), écart $< \pm 0,005$ mm.

Polissage : Pâte à polir diamantée (0,51 μ m), 1000 tr/min, Ra $< 0,1$ μ m, anti-adhérence augmentée de 25 %.

2.5 Revêtement

Méthode : PVD/CVD (cible Cr/Al/Ti, $> 99,99$ %).

Paramètres : TiAlN / AlCrN /DLC (25 μ m), 10^{-5} Pa, 250-450°C, polarisation 100 V, vitesse de dépôt 11,5 μ m/h.

Résultats : Adhérence > 100 N, coefficient de frottement $< 0,15$, résistance à la température 600-1100°C.

2.6 Intégration intelligente

Capteur : MEMS (température, pression, $< 0,5$ mm) ou jauge de contrainte (NiCr , 0,01 mm), erreur $< \pm 0,5$ %.

Conditionnement : Soudure laser (coque Ti, étanchéité $< 10^{-8}$ Pa·m³/s), résistance température 1000°C, résistance vibrations 50 g.

Transmission de données : puce intégrée (5G/Bluetooth, latence < 5 ms, consommation électrique < 30 mW), prenant en charge les protocoles IIoT (OPC UA, MQTT).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.7 Détection

Microstructure : MEB (grain 0,2-0,5 μm), EBSD (contrainte aux joints de grains $< 3 \%$).

Performances : Écart de dureté $< \pm 40 \text{ HV}$ (ISO 6508), usure $< 0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, résistance à la corrosion ($< 0,01 \text{ mm/an}$).

Géométrie : CMM (écart $< \pm 0,005 \text{ mm}$), balayage laser (écart de cavité $< \pm 0,003 \text{ mm}$).

Contrôle non destructif : rayons X (défauts $< 0,01 \text{ mm}$), ultrasons (fissures $< 0,005 \text{ mm}$).

Tests intelligents : température ($\pm 0,5^\circ\text{C}$, IEC 60751), pression ($\pm 0,1 \text{ MPa}$, IEC 61298), déformation ($\pm 1 \mu\epsilon$, ASTM E251).

Essais environnementaux : choc thermique ($\Delta T 800^\circ\text{C}$, $> 10^5$ cycles, ISO 17879), brouillard salin (1000 heures, ISO 9227).

3. Scénarios d'application des moules intelligents en carbure cimenté

En réponse aux exigences de haute précision et de haute fiabilité de la fabrication intelligente, les moules intelligents en carbure cimenté fournissent des suggestions de processus, de tests et de sélection :

3.1 Matrice intelligente en carbure cimenté pour forgeage à chaud automobile (vilebrequin)

Conditions de travail : $1000-1200^\circ\text{C}$, 300 MPa , choc thermique cyclique ($\Delta T 800^\circ\text{C}$), moulage 10^5 fois.

conception

Type : Matrice de forgeage (empreinte $100 \times 50 \text{ mm}$).

Matériau : WC10%Co (D50 0,2-0,5 μm , Cr3C2 0,5 % en poids, TaC 0,3 % en poids), dureté 2000-2200 HV.

Revêtement : AlCrN (5 μm , PVD, dureté 3400 HV, résistance à la température 1100°C).

Composants intelligents : MEMS (température $\pm 0,5^\circ\text{C}$, pression $\pm 0,1 \text{ MPa}$), intégrés dans la cavité.

Géométrie : Rayon de cavité R2 mm, Ra $< 0,2 \mu\text{m}$, écart $< \pm 0,01 \text{ mm}$.

Procédé : broyage à billes 22 heures, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes, PVD AlCrN (450°C), soudage laser MEMS.

Paramètres : température 1100°C , pression 300 MPa, cycles 5000 fois, taux d'échantillonnage 1 kHz. test:

Durée de vie : 10 000 fois (acier H13 2 000 fois, 5 fois plus long).

Taux d'usure : $< 0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, résistance à l'oxydation $< 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$.

Fissure thermique : Aucune fissure ($\Delta T 800^\circ\text{C}$, 5000 fois).

Précision de surveillance : température $\pm 0,5^\circ\text{C}$, pression $\pm 0,1 \text{ MPa}$, taux de maintenance prévu augmenté de 20 %.

Sélection : WCCo+AlCrN+MEMS, adapté aux températures élevées et aux contraintes élevées, CND régulier.

Avantages : résistance à l'usure à haute température, surveillance intelligente, efficacité de moulage augmentée de 15 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2 Moule intelligent en carbure cimenté pour moulage sous pression aéronautique (aube de turbine)

Conditions de travail : 700-800°C, 150 MPa, choc thermique cyclique (ΔT 500°C), moulage 10^6 fois.

conception

Type : Moule de moulage sous pression (empreinte 200×100 mm).

Matériau : WC8%Co (D50 0,2-0,5 μm , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 2000-2200 HV.

Revêtement : TiAlN (4 μm , PVD, dureté 3200 HV, résistance à la température 1050°C).

Composants intelligents : jauges de contrainte (déformation $\pm 1 \mu\epsilon$), intégrées à la surface du moule.

Géométrie : Pente de la cavité 1°, Ra < 0,1 μm , écart $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$.

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes, PVD TiAlN (400°C), montage de jauges de contrainte.

Paramètres : température 750°C, pression 150 MPa, cycle 10000 fois, taux d'échantillonnage 500 Hz.

test:

Durée de vie : 50 000 fois (acier H13 10 000 fois, 5 fois plus long).

Taux d'usure : < 0,02 mm³/h, anti-adhérence augmentée de 25%.

Fissure thermique : Aucune fissure (ΔT 500°C, 10000 fois).

Précision de surveillance : déformation $\pm 1 \mu\epsilon$, taux de détection des défauts augmenté de 15 %.

Sélectionnez le type : WCCo+TiAlN + jauge de contrainte, adapté à la fusion à haute température, nettoyage régulier.

Avantages : anti-adhérence, retour intelligent, qualité de coulée augmentée de 10 %.

3.3 Moule intelligent en alliage dur pour le formage de verre électronique (écran de téléphone portable)

Conditions de travail : 1000-1100°C, 50 MPa, corrosif (pH 24), 10^5 fois le moulage.

conception

Type : Moulé sous pression ($\varnothing$ 50 mm, courbé).

Matériau : WC10%Ni (D50 0,2-0,5 μm , Cr3C2 0,6 % en poids), dureté 2000-2200 HV.

Revêtement : DLC (3 μm , PVD, coefficient de frottement < 0,1, résistance à la température 600°C).

Composants intelligents : MEMS (température $\pm 0,5^\circ\text{C}$), intégrés dans le noyau du moule.

Géométrie : Écart de surface $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$, Ra < 0,1 μm .

Procédé : broyage à billes 22 heures, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa, 2 heures), rectification 5 axes, PVD DLC (300°C), soudage laser MEMS.

Paramètres : température 1050°C, pression 50 MPa, cycles 2000 fois, taux d'échantillonnage 2 kHz.

test:

Durée de vie : 8000 fois (acier H13 1500 fois, 5,3 fois plus long).

Taux d'usure : < 0,03 mm³ / h, résistance à la corrosion < 0,01 mm/an.

Anti-adhérence : Taux de résidus de verre < 1%, Ra 0,1 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Précision de surveillance : température $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, cohérence de la qualité augmentée de 20%.

Sélectionnez le type : WCNi+DLC+MEMS, adapté aux températures élevées corrosives, nettoyage régulier.

Avantages : résistance à la corrosion, surveillance intelligente, haute précision de moulage.

Comparaison des performances des moules intelligents en carbure cémenté

paramètre	Carbure cémenté (WCCo /Ni)	Acier moulé (H13)	moule en céramique
Dureté (HV)	1800-2200	400-600	1200-1500
Résistance à la flexion (GPa)	2,0 - 2,8	1,5 - 2,0	0,5 - 1,0
Ténacité (KIC, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	12-20	20-30	35
Résistance à l'usure (mm^3/h)	<0,03	0,1 - 0,3	0,05 - 0,1
Résistance à la corrosion (mm/an , pH 212)	<0,01	0,05 - 0,1	0,01 - 0,03
Résistance à la température ($^{\circ}\text{C}$)	>1000	600-800	1200-1500
Choc thermique (ΔT 800°C)	>10 ⁵ fois	10 ³ - 10 ⁴ fois	10 ² - 10 ³ fois
Durée de vie multiple (par rapport à H13)	35	1	1,52
Coefficient de frottement (revêtement)	<0,15	0,3 - 0,5	0,2 - 0,4
Précision de la surveillance	$\pm 0,5\%$	aucun	aucun

Points forts du moule intelligent en carbure cémenté :

Résistance à l'usure : substrat WC, usure < 0,03 mm^3/h , durée de vie augmentée de 35 fois.

Résistance aux hautes températures : revêtement TiAlN / AlCrN, anti-oxydation, adapté à 1200°C .

Résistance à la corrosion : à base de Ni + DLC, résistant à la fusion du verre, meilleur que l'acier H13.

Intelligence : MEMS/jauge de contrainte, surveillance en temps réel, augmentation de l'efficacité de 20 %.

Suggestions d'optimisation pour les moules intelligents en carbure cémenté

Sélection des matériaux :

Forgeage à chaud automobile : WC10%Co+AlCrN, résistance à l'usure à haute température augmentée de 15 %.

Moulage sous pression pour l'aviation : WC8%Co+TiAlN, anti-adhérence augmentée de 25 %.

Verre électronique : WC10%Ni+DLC, résistance à la corrosion augmentée de 20%.

Additifs : Cr3C2 0,6 % en poids, TaC 0,3 % en poids, dureté augmentée de 6 %.

Optimisation des processus :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Frittage : HIP 1400°C, 150 MPa, porosité <0,0005%, résistance à l'usure augmentée de 20%.

Rectification : CNC 5 axes, meule CBN (24 µm), écart <±0,01 mm, Ra <0,1 µm.

revêtement:

TiAlN (4 µm, 400°C), résistance à haute température augmentée de 15%.

AlCrN (5 µm, 450°C), résistance à l'oxydation augmentée de 20%.

DLC (3 µm, 300°C), anti-adhérence augmentée de 25%.

EDM : Écart de cavité <±0,003 mm, précision augmentée de 5 %.

Intégration intelligente :

Capteurs : MEMS (température, pression), jauge de contrainte (contrainte), erreur <±0,5%.

Traitement des données : Puces embarquées, support IIoT, taux de maintenance prédictive augmenté de 20 %.

Boîtier : boîtier Ti, étanchéité à l'air <10⁻⁸ Pa·m³ / s, résistance aux vibrations 50 g.

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température ±2°C, 10⁻⁶ Pa.

CNC 5 axes : Écart <±0,005 mm.

Équipement de revêtement : taux de dépôt 11,5 µm/h, écart <±0,05 µm.

Adaptation des conditions de travail :

Forgeage à chaud automobile : WCCo+AlCrN, 1000-1200°C, 300-500 MPa.

Moulage sous pression pour l'aviation : WCCo+TiAlN, 700-800°C, 100-200 MPa.

Verre électronique : WCNi+DLC, 1000-1100°C, 50-100 MPa.

Tests et vérifications :

Microstructure : MEB (grain 0,20,5 µm), EBSD (contrainte aux joints de grains <3%).

Performances : ASTM G65 (<0,03 mm³/h), résistance à la corrosion (<0,01 mm/an), résistance à la température (>1000°C, <0,01 mg/cm²).

Géométrie : CMM (écart < ± 0,005 mm), balayage laser (écart de cavité < ± 0,003 mm).

Intelligent : IEC 60751 (température ±0,5°C), IEC 61298 (pression ±0,1 MPa), ASTM E251 (déformation ±1 µε).

Environnement : ISO 17879 (choc thermique, >10⁵ fois), ISO 9227 (brouillard salin, 1000 heures).

Normes et spécifications

GB/T 183762014 : Porosité < 0,01 %.

GB/T 38502015 : Écart de densité <±0,1 g/ cm³.

GB/T 38512015 : Résistance 2,0-2,8 GPa.

GB/T 79972017 : Dureté 18002200 HV.

ASTM G65 : Taux d'usure < 0,03 mm³ / h.

NACE MR0175 : Résistance à la fissuration sous contrainte due au sulfure.

ISO 17879 : Essai de choc 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

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

ISO 9001 : Management de la qualité.

IEC 60751 : Précision des capteurs de température.

IEC 61298 : Précision des capteurs de pression.

En optimisant le WC à grain ultrafin (0,20,5 μm), la phase de liaison Co/Ni (612 % en poids), le revêtement PVD/CVD (TiAlN/AlCrN/DLC, 25 μm) et l'intégration MEMS/jauge de contrainte, le moule intelligent en carbure cémenté atteint une dureté élevée (1800-2200 HV), une résistance à l'usure ($<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$), une résistance à la corrosion ($<0,01 \text{ mm/an}$), une résistance aux hautes températures ($>1000^\circ\text{C}$) et une surveillance de haute précision (erreur $<\pm 0,5 \%$). Le moule est adapté au forgeage à chaud automobile, au moulage sous pression aéronautique et au moulage de verre électronique, avec une durée de vie multipliée par 35, un Ra de 0,10,3 μm et une augmentation de l'efficacité de production de 1520 %. L'optimisation de la granulométrie, de l'épaisseur du revêtement et l'intégration intelligente permettent de réduire les coûts, mais le défi réside dans l'usinage de haute précision (augmentation des coûts de 15 %) et la durabilité des capteurs (plus de 10 fois supérieure). Les moules intelligents en carbure sont supérieurs aux moules en acier H13 et en céramique et répondent aux exigences de fiabilité élevées de la fabrication intelligente (ISO 9001).

appendice:

Pièces de robot en carbure

Les pièces robotiques en carbure cimenté sont fabriquées à partir de carbure de tungstène (WC) comme matrice (85 à 92 % en poids), associé à du Co (6 à 10 % en poids) ou du Ni (6 à 12 % en poids) comme phase liante, et sont préparées par métallurgie des poudres (broyage à boulets, CIP, frittage HIP). Elles présentent une dureté élevée (1 600 à 2 000 HV), une excellente résistance à l'usure (perte par usure < 0,02 mm³/h, ASTM G65), à la corrosion (< 0,01 mm/an, pH 212, contenant HCl, SO₄²⁻), aux températures élevées (> 800 °C, résistance à l'oxydation) et aux chocs (> 10⁶ fois, ISO 1791). Un revêtement PVD/CVD (TiN, DLC, AlCrN, 13 µm, coefficient de frottement < 0,2) est appliqué en surface pour améliorer la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et les faibles frottements. Ces composants sont utilisés dans les robots industriels (articulations, pinces, engrenages), les robots de service (boîtiers, pièces de transmission) et les robots spéciaux (hauturiers, aérospatial), et sont soumis à des charges élevées (100 à 1 000 N), des mouvements à haute fréquence (10⁵ à 10⁷ cycles) et des environnements extrêmes (40 °C à 800 °C, brouillard salin, sable et poussière). Leur durée de vie est 510 fois supérieure à celle des matériaux traditionnels (acier inoxydable, alliage d'aluminium, 200 à 600 HV), et leur rugosité de surface est de Ra 0,05 à 0,2 µm.

Basé sur les normes (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 1791, ISO 9001), cet article fournit les suggestions de conception, de processus, de performances, d'application et d'optimisation des composants de robot en carbure cimenté.

1. Caractéristiques des pièces de robots en carbure

1.1 Composition matérielle des pièces de robots de machines en carbure

Matrice:

WC : 85 - 92 % en poids, grain ultrafin (D50 0,1 - 0,4 µm), dureté 1600 - 2000 HV.

Co : 6 - 10 % en poids, ténacité élevée (K_{IC} 1015 MPa·m^{1/2}), résistance aux chocs augmentée de 10 %.

Ni : 6 - 12 % en poids (facultatif), résistance à la corrosion (HCl, SO₄²⁻ < 0,01 mm/an), résistance à l'oxydation à haute température.

Additifs : Cr₃C₂ (0,2-0,5 % en poids), inhibe la croissance des grains et augmente la dureté de 5 % ;

TaC (0,1 - 0,3 % en poids), augmente les propriétés antioxydantes de 10 %.

revêtement:

TiN (PVD) : dureté 2000 - 2400 HV, résistance à la température 800°C, résistance à l'usure.

DLC (PVD) : dureté 2500 - 3000 HV, coefficient de frottement < 0,1, résistance à la température 600°C, anti-adhérence.

AlCrN (PVD) : dureté 3000 - 3400 HV, résistance à la température 1100°C, résistance à la corrosion.

Structure à gradient : faible rapport Co/Ni en surface (6 - 8 % en poids), rapport Co/Ni élevé au cœur (10 - 12 % en poids), augmentation de 20 % de la résistance à l'usure, augmentation de 15 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la résistance aux fissures.

1.2 Paramètres de performance des pièces de robot de machine en carbure

Dureté : 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 1,8 - 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : $1015 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (à base de Co 1215, à base de Ni 1012).

Résistance à l'usure : Taux d'usure $< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{h}$ (ASTM G65).

Résistance à la corrosion : pH 212, $< 0,01 \text{ mm/an}$ (NACE MR0175).

Résistance aux hautes températures : $> 800^\circ\text{C}$, résistance à l'oxydation ($< 0,01 \text{ mg/cm}^2$, 500 heures).

Résistance aux chocs : $> 10^6$ fois (ISO 1791, charge 100 N).

Coefficient de frottement : $< 0,2$ (revêtement), anti-adhérence augmentée de 25 %.

Rugosité de surface : $R_a 0,05 - 0,2 \mu\text{m}$, stabilité du mouvement augmentée de 20 %.

1.3 Avantages des pièces de robot en carbure

Haute résistance à l'usure : Revêtement WC+ à grain ultrafin, durée de vie augmentée de 510 fois, entretien réduit de 30 %.

Résistance à la corrosion : à base de Ni + DLC/AlCrN, résistant aux embruns salins/produits chimiques, adapté aux environnements marins/chimiques.

Résistance aux hautes températures : revêtement AlCrN, anti-oxydation, adapté au fonctionnement à haute température (800°C , robot de soudage).

Résistance aux chocs : Co/Ni haute ténacité, résiste aux mouvements à haute fréquence ($> 10^6$ fois), mieux que l'alliage d'aluminium.

Faible frottement : revêtement DLC/TiN, coefficient de frottement $< 0,2$, efficacité de mouvement augmentée de 15 %.

2. Processus de fabrication de pièces de robot en carbure

2.1 Préparation de la poudre

Matières premières : WC (D50 0,1 - 0,4 μm , pureté $> 99,95 \%$), Co/Ni (D50 0,51 μm), Cr₃C₂/ TaC (D50 0,51 μm).

Broyage à boulets : Broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, 15:1), 400 tr/min, 1620 heures, écart granulométrique $\leq \pm 0,03 \mu\text{m}$, uniformité $> 99 \%$.

2.2 Formation

Méthode : Pressage isostatique à froid (CIP) ou moulage de précision.

Paramètres : 250 - 300 MPa, pression de maintien 60 secondes, moule en acier au tungstène (écart $< \pm 0,02 \text{ mm}$), densité de la billette 8,5 - 10,0 g/cm³.

Résultats : Écart dimensionnel $\leq \pm 0,03 \text{ mm}$, taux de fissures $< 0,3 \%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 Frittage

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre:

Déparaffinage : 200 - 500°C, 2°C/min, atmosphère H₂ (O₂ <2 ppm), 10⁻³ Pa .

Frittage : 1350 - 1400°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Pa, 22,5 heures.

HIP : 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 heures.

Résultats : Densité 14,8 - 15,0 g/ cm³, porosité < 0,0003 %, dureté 1600 - 2000 HV.

2.4 Usinage de précision

Rectification : Rectifieuse CNC 5 axes, meule CBN (13 µm), 5000 tr/min, avance 0,003 - 0,01 mm/passe, écart géométrique <±0,005 mm, Ra 0,050,2 µm.

EDM : Usinage par électroérosion, rainure/trou (Ø 0,21 mm), écart <±0,003 mm.

Polissage : Pâte à polir diamantée (0,30,5 µm), 1200 tr/min, Ra < 0,05 µm, coefficient de frottement réduit de 10 %.

2.5 Revêtement

Méthode : PVD/CVD (cible Ti/Cr/Al, >99,99%).

Paramètres : TiN /DLC/ AlCrN (13 µm), 10⁻⁵ Pa, 200-400°C, polarisation 80 V, taux de dépôt 0,51 µm/h.

Résultats : Adhérence >80 N, coefficient de frottement <0,2, résistance à la température 600 - 1100°C.

2.6 Détection

Microstructure : MEB (grain 0,10,4 µm), EBSD (contrainte aux joints de grains <2%).

Performances : Écart de dureté <±30 HV (ISO 6508), usure <0,02 mm³/h, résistance à la corrosion (<0,01 mm/an).

Géométrie : CMM (écart < ± 0,003 mm), balayage laser (écart de fente < ± 0,002 mm).

Contrôle non destructif : rayons X (défauts < 0,005 mm), ultrasons (fissures < 0,003 mm).

Essais environnementaux : ISO 9227 (brouillard salin, 1000 heures), ISO 1791 (choc, >10⁶ fois).

3. Scénarios d'application des pièces de robots de machines en carbure

Les composants de robot en carbure fournissent des suggestions de processus, de tests et de sélection pour les charges élevées, les mouvements à haute fréquence et les environnements extrêmes :

3.1 Pièces de robot de machine en carbure Joints de robot industriel (robots de soudage)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conditions de fonctionnement : 800°C, charge 500 N, 10^6 tours, environnement sec.

conception

Type : Rotule ($\varnothing$ 20 mm, épaisseur 5 mm).

Matériau : WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μ m, Cr3C2 0,3 % en poids, TaC 0,2 % en poids), dureté 1900 HV.

Revêtement : AlCrN (2 μ m, PVD, résistance à la température 1100°C, dureté 3400 HV).

Géométrie : circularité $<\pm 0,002$ mm, Ra $<0,1$ μ m.

Procédé : broyage à billes 20 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification 5 axes, PVD AlCrN (400°C).

Paramètres : charge 500 N, vitesse de rotation 100 tr/min, température 800°C.

test:

Durée de vie : 2×10^6 fois (3×10^5 fois pour l'acier inoxydable, 6,7 fois plus longue).

Taux d'usure : $< 0,01$ mm³/h, coefficient de frottement $< 0,15$.

Résistance à haute température : 800°C, 500 heures, pas d'oxydation.

Résistance aux chocs : 500 N, 10^6 fois, pas de fissures.

Sélection : WCCo+AlCrN, adapté aux températures élevées et aux charges élevées, CND régulier.

Avantages : Résistance à l'usure à haute température, stabilité du mouvement augmentée de 20 %.

3.2 Pièces de robot de machine en carbure Pince de robot de service (robot logistique)

Conditions : 20°C à 60°C, charge 200 N, 10^7 prises, environnement humide (85% HR).

conception

Type : Dents de préhension (10×5 mm, épaisseur 2 mm).

Matériau : WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 μ m, Cr3C2 0,4 % en poids), dureté 1700 HV.

Revêtement : DLC (1,5 μ m, PVD, coefficient de frottement $< 0,1$, résistance à la température 600°C).

Géométrie : Écart de la pointe de la dent $<\pm 0,003$ mm, Ra $<0,05$ μ m.

Procédé : broyage à billes 18 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), EDM, PVD DLC (250°C).

Paramètres : charge 200 N, fréquence de préhension 1 Hz, humidité 85% HR.

test:

Durée de vie : $1,5 \times 10^7$ fois (2×10^6 fois pour l'alliage d'aluminium, 7,5 fois plus longue).

Taux d'usure : $< 0,02$ mm³ / h, résistance à la corrosion $< 0,01$ mm/an.

Anti-adhérence : Taux de défaillance de préhension < 1 %, coefficient de frottement $< 0,1$.

Résistance à l'humidité : 85 % HR, 1 000 heures, pas de corrosion.

Sélection : WCNi+DLC, adapté aux hautes fréquences en environnement humide, nettoyage régulier.

Avantages : faible frottement, résistance à la corrosion, augmentation de 15 % de l'efficacité de préhension.

3.3 Pièces de robot en carbure Engrenages de robot spéciaux (robot sous-marin)

Conditions : 40°C à 100°C, charge 1000 N, 10^6 cycles, eau de mer (pH 8).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conception

Type : Engrenage droit (Ø 30 mm, module 2).

Matériau : WC8%Ni (D50 0,1 -

0,4 µm, Cr3C2 0,4 % en poids, TaC 0,3 % en poids, dureté 1800 HV.

Revêtement : TiN (2 µm, PVD, résistance à la température 800°C, dureté 2400 HV).

Géométrie : Écart du profil de la dent $\leq \pm 0,002$ mm, Ra $< 0,1$ µm.

Procédé : broyage à billes 20 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification 5 axes, PVD TiN (300°C).

Paramètres : charge 1000 N, vitesse de transmission 50 tr/min, pression 100 MPa.

test:

Durée de vie : 2×10^6 fois (acier inoxydable 4×10^5 fois, 5 fois plus long).

Taux d'usure : $< 0,01$ mm³ / h, résistance à la corrosion $< 0,01$ mm/an.

Résistance à l'eau de mer : pH 8, 1000 heures, pas de corrosion.

Résistance aux chocs : 1000 N, 10^6 fois, pas de casse.

Sélection : WCNi+TiN, adapté aux hautes pressions en haute mer, CND régulier.

Avantages : résistance à la corrosion et à l'usure, stabilité de la transmission augmentée de 20 %.

Comparaison des performances des pièces de robots de machines en carbure

paramètre	Carbure cémenté (WCCo /Ni)	Acier inoxydable (316L)	Alliage d'aluminium (7075)
Dureté (HV)	1600 - 2000	200 - 300	150 - 200
Résistance à la flexion (GPa)	1,8 - 2,5	0,5 -- 0,8	0,50,7
Ténacité (KIC, MPa·m ^{1/2})	10 - 15	50 - 70	20 - 30
Résistance à l'usure (mm ³ /h)	$< 0,02$	0,20,5	0,30,6
Résistance à la corrosion (mm/an, pH 212)	$< 0,01$	0,05 - 0,1	0,1 - 0,2
Résistance à la température (°C)	> 800	300 - 500	100 - 200
Résistance aux chocs (fois, 100 N)	$> 10^6$	$10^4 - 10^5$	$10^3 - 10^4$
Durée de vie multiple (par rapport à l'alliage d'aluminium)	5 - 10	vingt-trois	1
Coefficient de frottement (revêtement)	$< 0,2$	0,3 - 0,5	0,4 - 0,6

de machine en carbure :

Résistance à l'usure : substrat WC, usure $< 0,02$ mm³/h, durée de vie augmentée de 510 fois.

Résistance à la corrosion : à base de Ni + DLC/TiN, résistant à l'eau de mer/au brouillard salin, meilleur que l'acier inoxydable.

Résistance aux hautes températures : revêtement AlCrN, anti-oxydation, meilleur que l'alliage d'aluminium.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Faible frottement : revêtement DLC, coefficient de frottement $< 0,1$, efficacité de mouvement élevée.

5. Suggestions d'optimisation pour les pièces de robots de machines en carbure

Sélection des matériaux :

Joint de soudure : WC8%Co+AlCrN, résistance à l'usure à haute température augmentée de 15 %.

Pince logistique : WC10%Ni+DLC, anti-adhérence augmentée de 20%.

Engrenage pour haute mer : WC8%Ni+TiN, résistance à la corrosion augmentée de 15%.

Additifs : Cr3C2 0,4 % en poids, TaC 0,3 % en poids, dureté augmentée de 5 %.

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1350°C, 120 MPa, porosité $< 0,0003\%$, résistance à l'usure augmentée de 15%.

Rectification : CNC 5 axes, meule CBN (13 μm), écart $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$, Ra $< 0,05 \mu\text{m}$.

revêtement:

AlCrN (2 μm , PVD), résistance à haute température augmentée de 15 %.

DLC (1,5 μm , PVD), coefficient de frottement réduit de 10%.

TiN (2 μm , PVD), résistance à la corrosion augmentée de 20%.

EDM : Écart de fente $\leq \pm 0,002 \text{ mm}$, précision augmentée de 5 %.

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température $\pm 1^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa .

CNC 5 axes : Écart $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$.

Équipement de revêtement : taux de dépôt 0,51 $\mu\text{m/h}$, écart $\leq \pm 0,03 \mu\text{m}$.

Adaptation des conditions de travail :

Robot de soudage : WCCo+AlCrN, 800°C, 500 N, environnement sec.

Robot logistique : WCNi+DLC, 20°C à 60°C, 200 N, environnement humide.

Robot sous-marin : WCNi+TiN, 40°C à 100°C, 1000 N, eau de mer.

6. Inspection et vérification des pièces de robot de machine en carbure :

Microstructure : MEB (grain 0,10,4 μm), EBSD (contrainte aux joints de grains $< 2\%$).

Performances : ASTM G65 ($< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$), résistance à la corrosion ($< 0,01 \text{ mm/an}$), résistance à la température ($> 800^\circ\text{C}$, $< 0,01 \text{ mg/cm}^2$).

Géométrie : CMM (écart $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$), balayage laser (écart de fente $\leq \pm 0,002 \text{ mm}$).

Environnement : ISO 9227 (brouillard salin, 1000 heures), ISO 1791 (choc, $> 10^6$ fois).

Normes et spécifications pour les pièces de robots de machines en carbure

GB/T 183762014 : Porosité $< 0,01 \%$.

GB/T 38502015 : Écart de densité $\leq \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

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

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

GB/T 38512015 : Résistance 1,8 - 2,5 GPa.

GB/T 79972017 : Dureté 1600 - 2000 HV.

ASTM G65 : Taux d'usure $< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{h}$.

NACE MR0175 : Résistance à la fissuration sous contrainte due au sulfure.

ISO 1791 : Essais d'impact.

ISO 9001 : Management de la qualité.

Français En optimisant le WC à grain ultrafin ($0,1 - 0,4 \mu\text{m}$), la phase de liaison Co/Ni (6 - 12 % en poids) et le revêtement PVD/CVD (TiN /DLC/AlCrN, $13 \mu\text{m}$), les pièces de robot en carbure cémenté atteignent une dureté élevée (1600 - 2000 HV), une résistance à l'usure ($< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$), une résistance à la corrosion ($< 0,01 \text{ mm}/\text{an}$), une résistance aux hautes températures ($> 800^\circ\text{C}$) et une résistance aux chocs ($> 10^6$ fois). Les pièces sont adaptées aux articulations de robots industriels, aux pinces de robots de service et aux engrenages de robots spéciaux, avec une durée de vie de 510 fois, Ra $0,05 - 0,2 \mu\text{m}$ et une augmentation de l'efficacité de mouvement de 15 %. L'optimisation de la granulométrie, de l'épaisseur du revêtement et de la précision de l'électroérosion permet de réduire les coûts, mais les défis résident dans l'usinage ultra-précis (augmentation des coûts de 10 %) et les tests en conditions extrêmes (plus de 10 fois). Le carbure cémenté est supérieur à l'acier inoxydable et aux alliages d'aluminium et répond aux exigences de fiabilité élevées des robots (ISO 9001).

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

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

appendice:

Capteur d'aviation en carbure

Les capteurs aéronautiques en carbure cimenté sont constitués de carbure de tungstène (WC) comme matrice (85 à 92 % en poids), associé à du Co (6 à 10 % en poids) ou du Ni (6 à 12 % en poids) comme phase de liaison, et sont préparés par métallurgie des poudres (broyage à billes, CIP, frittage HIP). Ils présentent une dureté élevée (1 600 à 2 000 HV), une excellente résistance à l'usure (volume d'usure < 0,02 mm³/h, ASTM G65), à la corrosion (< 0,01 mm/an, pH 212, contenant HCl, SO₄²⁻), à haute température (> 800 °C, anti-oxydation) et aux vibrations (> 10⁶ fois, MILSTD810G). Français La surface est revêtue d'un revêtement PVD/CVD (tel que TiN, Al₂O₃, 13 µm, coefficient de frottement < 0,2) ou d'un revêtement fonctionnel (Au, Ag, 0,52 µm, conductivité > 90 % IACS) pour améliorer la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et les propriétés électriques. Le capteur est utilisé dans les domaines aérospatiaux (tels que la surveillance des moteurs, les commandes de vol, la surveillance de l'état des structures), résiste aux environnements extrêmes (55 °C à 800 °C, vibrations de 10100 g, 10⁵ 10⁷ cycles), fournit des données de haute précision (erreur < ± 0,5 %), et a une durée de vie 510 fois supérieure à celle des matériaux traditionnels (tels que l'acier inoxydable, l'alliage de titane, 400 - 600 HV), avec une rugosité de surface de Ra 0,05 - 0,2 µm.

Basé sur les normes (GB/T 7997, ASTM G65, MILSTD810G, AS9100), cet article fournit la technologie, les performances, l'application et les suggestions d'optimisation des capteurs d'aviation en carbure cimenté.

1. Caractéristiques des capteurs aéronautiques en carbure cimenté

1.1 Composition du matériau des capteurs d'aviation en carbure cimenté

Matrice:

WC : 85 - 92 % en poids, grain ultrafin (D50 0,1 - 0,4 µm), dureté 1600 - 2000 HV.

Co : 6 - 10 % en poids, ténacité élevée (K_{IC} 10 - 15 MPa·m^{1/2}), résistance aux vibrations augmentée de 10 %.

Ni : 6 - 12 % en poids (facultatif), résistance à la corrosion (HCl, SO₄²⁻ < 0,01 mm/an), résistance à l'oxydation à haute température.

Additifs : Cr₃C₂ (0,2 - 0,5 % en poids), inhibe la croissance des grains et augmente la dureté de 5 % ; TaC (0,1 - 0,3 % en poids), augmente les propriétés antioxydantes de 10 %.

revêtement:

TiN (PVD) : dureté 2000 - 2400 HV, résistance à la température 800°C, résistance à l'usure.

Al₂O₃ (CVD) : dureté 1800 - 2200 HV, résistance à la température 1000°C, résistance à la corrosion.

Au/Ag (PVD) : conductivité >90% IACS, résistance à la température 500 - 600°C, anti-oxydation.

Structure à gradient : faible rapport Co/Ni en surface (6 - 8 % en poids), rapport Co/Ni élevé au cœur (10 - 12 % en poids), résistance à l'usure augmentée de 20 %, résistance aux fissures augmentée de 15 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 Paramètres de performance des capteurs aéronautiques en carbure cimenté

Dureté : 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 1,8 - 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : 1015 MPa·m^{1/2} (à base de Co 1215, à base de Ni 1012).

Résistance à l'usure : Taux d'usure < 0,02 mm³ / h (ASTM G65).

Résistance à la corrosion : pH 212, < 0,01 mm/an (NACE MR0175).

Résistance aux hautes températures : >800°C, résistance à l'oxydation (<0,01 mg/cm², 500 heures).

Résistance aux vibrations : >10⁶ fois (10100 g, MILSTD810G).

Conductivité électrique : >90% IACS (revêtement Au/Ag, IEC 6051221).

Précision de mesure : erreur <±0,5% (température, pression, déformation).

Rugosité de surface : Ra 0,050,2 µm, stabilité du signal augmentée de 20 %.

1.3 Avantages des capteurs d'aviation en carbure cimenté

Haute résistance à l'usure : revêtement WC+ à grain ultrafin, la durée de vie est augmentée de 510 fois et le taux de défaillance est réduit de 30 %.

Résistance aux hautes températures : revêtement TiN / Al₂O₃, anti-oxydation, adapté aux environnements à haute température (800°C, moteur).

Résistance à la corrosion : à base de Ni + Al₂O₃, résistant au carburant d'aviation/au brouillard salin, adapté aux environnements difficiles.

Résistance aux vibrations : Co/Ni haute ténacité, résiste aux vibrations à haute fréquence (> 10⁶ fois), mieux que l'alliage de titane.

Haute précision : revêtement à faible frottement + usinage de précision, erreur de données <±0,5 %, atténuation du signal réduite de 15 %.

2. Procédé de fabrication de capteurs aéronautiques en carbure cimenté

2.1 Préparation de la poudre

Matières premières : WC (D50 0,1 - 0,4 µm, pureté > 99,95 %), Co/Ni (D50 0,51 µm), Cr₃C₂/ TaC (D50 0,51 µm).

Broyage à boulets : broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, 15:1), 400 tr/min, 1620 heures, écart granulométrique <±0,03 µm, uniformité >99 %.

2.2 Formation

Méthode : Pressage isostatique à froid (CIP) ou moulage de précision.

Paramètres : 250 - 300 MPa, pression de maintien 60 secondes, moule en acier au tungstène (écart < ± 0,02 mm), densité de la billette 8,5 - 10,0 g/cm³.

Résultats : Écart dimensionnel <±0,03 mm, taux de fissures <0,3 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 Frittage

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre:

Déparaffinage : 200 - 500°C, 2°C/min, atmosphère H₂ (O₂ <2 ppm), 10⁻³ Pa.

Frittage : 1350 - 1400°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Pa, 22,5 heures.

CIC : 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Résultats : Densité 14,8 - 15,0 g/cm³, porosité < 0,0003 %, dureté 1600 - 2000 HV.

2.4 Usinage de précision

Rectification : Rectifieuse CNC 5 axes, meule CBN (13 µm), 5000 tr/min, avance 0,003 - 0,01 mm/passe, écart géométrique <±0,005 mm, Ra 0,05 - 0,2 µm.

EDM : Usinage par électroérosion, micro trou/fente (Ø 0,1-0,5 mm), écart <±0,003 mm.

Polissage : Pâte à polir diamantée (0,30,5 µm), 1200 tr/min, Ra < 0,05 µm, stabilité du signal augmentée de 10 %.

2.5 Revêtement

Méthode : PVD/CVD (cibles Ti/Al/Au/Ag, > 99,99 %).

Paramètres : TiN / Al₂O₃ / Au/Ag (13 µm), 10⁻⁵ Pa, 200400 °C, polarisation 80 V, vitesse de dépôt 0,51 µm/h.

Résultats : Adhérence > 80 N, coefficient de frottement < 0,2, conductivité > 90 % IACS.

2.6 Intégration des capteurs

Éléments de détection : MEMS (à base de silicium, taille < 0,5 mm) ou jauges de contrainte (NiCr, 0,01 mm d'épaisseur), surveillant la température (± 0,5 °C), la pression (± 0,1 MPa) et la contrainte (± 1 µε).

Conditionnement : Soudure laser (coque Ti, étanchéité < 10⁻⁸ Pa·m³/s), résistance température 800°C, résistance vibrations 100 g.

Transmission de données : module 5G/Bluetooth, latence < 5 ms, consommation électrique < 30 mW.

2.7 Détection

Microstructure : MEB (grain 0,10,4 µm), EBSD (contrainte aux joints de grains <2%).

Performances : Écart de dureté <±30 HV (ISO 6508), usure <0,02 mm³/h, résistance à la corrosion (<0,01 mm/an).

Géométrie : CMM (écart < ± 0,003 mm), balayage laser (écart de fente < ± 0,002 mm).

Contrôle non destructif : rayons X (défauts < 0,005 mm), ultrasons (fissures < 0,003 mm).

Tests environnementaux : MILSTD810G (55°C à 800°C, 100 g de vibrations, 10⁶ cycles).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Propriétés électriques : conductivité > 90 % IACS, erreur de signal < $\pm 0,5$ % (IEC 6051221).

3. Scénarios d'application des capteurs aéronautiques en carbure cémenté

Les capteurs d'aviation en carbure fournissent des suggestions de processus, de tests et de sélection pour les environnements extrêmes et les exigences de haute précision :

3.1 Capteur de température/pression pour moteur d'aviation en carbure

Conditions : 800°C, 50 MPa, 100 g de vibrations, environnement de carburant d'aviation, 10^6 cycles.
conception

Type : Capteur de pression/température MEMS ($\varnothing$ 10 mm, épaisseur 2 mm).

Matériau : WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μ m, Cr3C2 0,3 % en poids, TaC 0,2 % en poids), dureté 1900 HV.

Revêtement : Al₂O₃ (2 μ m, CVD, résistance à la température 1000°C, résistance à la corrosion).

Géométrie : Écart de planéité $\leq \pm 0,002$ mm, Ra < 0,05 μ m.

Procédés : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification 5 axes, CVD Al₂O₃ (400°C), intégration MEMS, soudage laser.

Paramètres : température 800°C, pression 50 MPa, vibration 100 g, fréquence d'échantillonnage 1 kHz.

test:

Durée de vie : 2×10^6 fois (alliage de titane 3×10^5 fois, 6,7 fois plus long).

Taux d'usure : < 0,01 mm³ / h, résistance à la corrosion < 0,01 mm/an.

Précision : erreur de température $\pm 0,5^\circ$ C, erreur de pression $\pm 0,1$ MPa.

Résistance aux vibrations : 100 g, 10^6 fois, aucune défaillance.

Sélection : WCCo+Al₂O₃, adapté aux hautes températures et hautes pressions, CND régulier.

Avantages : résistance à la corrosion à haute température, haute précision et augmentation de 10 % de l'efficacité du moteur.

3.2 Surveillance de l'état de santé structurel des capteurs d'aviation en carbure cémenté (capteurs de contrainte)

Conditions de fonctionnement : 55°C à 200°C, 10 g de vibrations, brouillard salin (5% NaCl), 10^7 cycles.

conception

Type : Capteur à jauge de contrainte (5×3 mm, épaisseur 0,5 mm).

Matériau : WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 μ m, Cr3C2 0,4 % en poids), dureté 1700 HV.

Revêtement : TiN (1 μ m, PVD, résistant à la température jusqu'à 800°C, résistant à l'usure).

Géométrie : Écart de surface $\leq \pm 0,003$ mm, Ra < 0,1 μ m.

Procédé : broyage à billes pendant 18 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), EDM, PVD TiN (250°C), montage de jauges de contrainte, soudage laser.

Paramètres : déformation ± 5000 μ ε, vibration 10 g, fréquence d'échantillonnage 500 Hz.

test:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durée de vie : $1,5 \times 10^7$ fois (acier inoxydable 2×10^6 fois, 7,5 fois plus longue).
Perte d'usure : $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, résistance au brouillard salin 1000 heures, augmentation de résistance $< 5 \%$.
Précision : erreur de déformation $\pm 1 \text{ } \mu\text{e}$, atténuation du signal $< 0,1 \%$.
Résistance aux vibrations : 10 g, 10^7 fois, aucune défaillance.
Sélection : WCNi+TiN, adapté à la corrosion à basse température, nettoyage régulier.
Avantages : Anti-corrosion par vibration, adapté à la surveillance des ailes/fuselage, sécurité augmentée de 15 %.

3.3 Capteur d'aviation en carbure pour contrôle de vol (capteur magnétique)

Conditions de fonctionnement : 40°C à 150°C, 20 g de vibrations, environnement sec, 10^6 cycles.
conception
Type : Capteur magnétique à effet Hall ($\varnothing 3 \text{ mm}$, épaisseur 1 mm).
Matériau : WC8%Co1%Ag (D50 0,10,4 μm , Cr3C2 0,3 % en poids), dureté 1800 HV.
Revêtement : Au (0,5 μm , PVD, conductivité $> 95\%$ IACS, résistance à la température 600°C).
Géométrie : Circularité $\pm 0,002 \text{ mm}$, Ra $< 0,05 \text{ } \mu\text{m}$.
Procédé : broyage à billes 20 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification 5 axes, PVD Au (200°C), intégration d'éléments Hall, soudage laser.
Paramètres : champ magnétique 0500 mT, vibration 20 g, fréquence d'échantillonnage 2 kHz.
test:
Durée de vie : 2×10^6 fois (alliage de titane 4×10^5 fois, 5 fois plus long).
Perte par usure : $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{h}$, résistance de contact $< 8 \text{ } \mu\Omega$.
Précision : erreur de champ magnétique $\pm 0,1 \text{ mT}$, stabilité du signal $\pm 0,5 \%$.
Résistance aux vibrations : 20 g, 10^6 fois, aucune défaillance.
Sélection : WCCo+Au, adapté aux environnements secs à haute conductivité, détection de résistance régulière.
Avantages : Conductivité de haute précision, adaptée au contrôle de navigation/d'attitude et fiabilité accrue de 20 %.

4. Comparaison des performances des capteurs d'aviation en carbure cémenté

paramètre	Carbure cémenté (WCCo /Ni)	Alliage de titane (Ti6Al4V)	Acier inoxydable (316L)
Dureté (HV)	1600 - 2000	300 - 400	200 - 300
Résistance à la flexion (GPa)	1,8 - 2,5	0,9 - 1,2	0,5 - 0,8
Ténacité (KIC, MPa·m ^{1 / 2})	10 - 15	40 - 60	50 - 70
Résistance à l'usure (mm ³ /h)	$< 0,02$	0.10.3	0,20,5
Résistance à la corrosion (mm/an, pH 212)	$< 0,01$	0,02 - 0,05	0,05 - 0,1
Résistance à la température (°C)	> 800	400 - 600	3005-00

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

paramètre	Carbure cémenté (WCCo /Ni)	Alliage de titane (Ti6Al4V)	Acier inoxydable (316L)
Résistance aux vibrations (fois, 100 g)	$>10^6$	$10^5 - 10^6$	$10^4 - 10^5$
Durée de vie multiple (par rapport à l'acier inoxydable)	5 - 10	vingt-trois	1
Conductivité électrique (% IACS)	>90	12	vingt-trois

Points forts des capteurs d'aviation en carbure :

Résistance à l'usure : substrat WC, usure $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, durée de vie augmentée de 510 fois.

résistance à la température : revêtement TiN / Al_2O_3 , anti-oxydation, meilleur que l'alliage de titane.

Résistance à la corrosion : à base de Ni + Al_2O_3 , résistant au brouillard salin/carburant, meilleur que l'acier inoxydable.

Haute précision : faible frottement + usinage de précision, erreur $< \pm 0,5\%$, meilleure que les matériaux traditionnels.

5. Suggestions d'optimisation pour les capteurs aéronautiques en carbure cémenté

Sélection des matériaux :

Surveillance du moteur : WC8%Co+ Al_2O_3 , résistance à la corrosion à haute température augmentée de 15 %.

Surveillance de l'état de santé structurel : WC10%Ni+TiN, résistance à la corrosion par vibration augmentée de 20 %.

Contrôle de vol : WC8%Co+Au, conductivité $> 95\%$ IACS, précision augmentée de 10%.

Additifs : Cr3C2 0,4 % en poids, TaC 0,3 % en poids, dureté augmentée de 5 %.

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1350°C, 120 MPa, porosité $< 0,0003\%$, résistance à l'usure augmentée de 15%.

Rectification : CNC 5 axes, meule CBN (13 μm), écart $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$, Ra $< 0,05 \mu\text{m}$.

revêtement:

Al_2O_3 (2 μm , CVD), résistance à haute température augmentée de 15 %.

TiN (1 μm , PVD), résistance à l'usure augmentée de 20 %.

Au (0,5 μm , PVD), résistance de contact réduite de 10 %.

EDM : Écart de micro-trou $\leq \pm 0,002 \text{ mm}$, précision augmentée de 5 %.

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température $\pm 1^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa .

CNC 5 axes : Écart $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$.

Équipement de revêtement : taux de dépôt 0,51 $\mu\text{m}/\text{h}$, écart $\leq \pm 0,03 \mu\text{m}$.

Adaptation des conditions de travail :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Moteur : WCCo + Al₂O₃ , 800 °C, 50 MPa, 100 g de vibrations.

Surveillance de structure : WCNi+TiN, 55°C à 200°C, vibration 10 g, brouillard salin.

Contrôle de vol : WCCo+Au, 40°C à 150°C, 20 g de vibrations, environnement sec.

6. Test et vérification des capteurs aéronautiques en alliage dur :

Microstructure : MEB (grain 0,10,4 µm), EBSD (contrainte aux joints de grains <2%).

Performances : ASTM G65 (<0,02 mm³/h), résistance à la corrosion (<0,01 mm/an), résistance à la température (>800°C, <0,01 mg/cm²).

Géométrie : CMM (écart < ± 0,003 mm), balayage laser (écart de fente < ± 0,002 mm).

Environnement : MILSTD810G (55°C à 800°C, 100 g, 10⁶ fois).

Propriétés électriques : conductivité > 90 % IACS, erreur < ± 0,5 % (IEC 6051221).

7. Normes et spécifications pour les capteurs aéronautiques en alliage dur

GB/T 183762014 : Porosité < 0,01 %.

GB/T 38502015 : Écart de densité <±0,1 g/ cm³.

GB/T 38512015 : Résistance 1,82,5 GPa.

GB/T 79972017 : Dureté 16002000 HV.

ASTM G65 : Taux d'usure < 0,02 mm³ / h.

NACE MR0175 : Résistance à la fissuration sous contrainte due au sulfure.

MILSTD810G : Adaptabilité environnementale (vibration, température, corrosion).

AS9100 : Gestion de la qualité aérospatiale.

IEC 6051221 : Résistance de contact < 10 µΩ .

Français En optimisant le WC à grain ultrafin (0,10,4 µm), la phase de liaison Co/Ni (612 % en poids), le revêtement PVD/CVD (TiN/Al₂O₃/Au, 13 µm) et l'intégration MEMS/jauge de contrainte, les capteurs aéronautiques en carbure cémenté atteignent une dureté élevée (1600-2000 HV), une résistance à l'usure (<0,02 mm³/h), une résistance à la corrosion (<0,01 mm/an), une résistance aux hautes températures (>800°C) et une haute précision (erreur <±0,5 %). Le capteur est adapté à la surveillance des moteurs, à la surveillance de l'état structurel et au contrôle de vol, avec une durée de vie multipliée par 510, un Ra de 0,05 à 0,2 µm et une fiabilité des données augmentée de 20 %. L'optimisation de la granulométrie, de l'épaisseur du revêtement et de l'intégration des MEMS permet de réduire les coûts, mais les défis résident dans l'usinage ultra-précis (augmentation des coûts de 10 %) et les tests en conditions extrêmes (> 10⁶ fois). Le carbure cémenté est supérieur à l'alliage de titane et à l'acier inoxydable et répond aux exigences strictes de l'aérospatiale (AS9100, MILSTD810G).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Outils de coupe en carbure intelligents

Les outils en carbure intelligent sont fabriqués à partir de carbure de tungstène (WC) comme matrice (88-94 % en poids), associé à du Co (6-10 % en poids) ou du Ni (6-12 % en poids) comme phase de liaison, et sont préparés par métallurgie des poudres (broyage à boulets, CIP, frittage HIP). Ils présentent une dureté élevée (1 800-2 200 HV), une résistance à l'usure (volume d'usure < 0,03 mm³/h, ASTM G65), une résistance à la corrosion (< 0,01 mm/an, pH 212, contenant HCl, SO₄²⁻) et une résistance aux températures élevées (> 1 000 °C, résistance à l'oxydation). Français La surface est revêtue d'un revêtement PVD/CVD (tel que DLC, TiAlN, AlCrN, 25 µm, coefficient de frottement < 0,15), intégré à une détection intelligente (température, usure, contrainte) et un contrôle adaptatif (optimisation des paramètres de coupe), ce qui améliore l'efficacité de l'usinage de 20 à 30 %, et la durée de vie est 35 fois plus longue que celle des outils traditionnels (acier inoxydable, 400-600 HV), avec une rugosité de surface de Ra 0,10,2 µm. L'outil est utilisé pour l'usinage de haute précision (aérospatiale, automobile, moule), adapté à la coupe à grande vitesse (1000-5000 tr/min), à la coupe à sec/humide et aux matériaux difficiles à usiner (alliage de titane, alliage à base de nickel). Basé sur les normes (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 6508), cet article fournit des outils en carbure intelligents, des processus, des performances, des applications et des suggestions d'optimisation.

1. Caractéristiques des outils intelligents en carbure

1.1 Composition du matériau de l'outil en carbure intelligent

Matrice:

WC : 88 - 94 % en poids, grain ultrafin (D50 0,2 - 0,5 µm), dureté 1800 - 2200 HV.

Co : 6 - 10 % en poids, ténacité élevée (K_{IC} 15 - 20 MPa·m^{1/2}), résistance à l'usure augmentée de 10 %.

Ni : 6 - 12 % en poids (facultatif), résistant à la corrosion (HCl, SO₄²⁻ < 0,01 mm/an), résistant aux chocs (K_{IC} 12 - 15 MPa·m^{1/2}).

Additifs : Cr₃C₂ (0,3 - 0,6 % en poids), inhibe la croissance des grains et augmente la dureté de 6 % ; TaC (0,1 - 0,3 % en poids), augmente les propriétés antioxydantes de 10 %.

revêtement:

DLC (PVD) : dureté 3000 - 3500 HV, coefficient de frottement < 0,1, résistance à la température 600°C, anti-adhérence.

TiAlN (PVD/CVD) : dureté 2800 - 3200 HV, résistance à la température 1050°C, résistance à l'érosion.

AlCrN (PVD) : dureté 3000 - 3400 HV, résistance à la température 1100°C, résistance à l'usure à haute température.

Structure à gradient : faible rapport Co/Ni en surface (6 - 8 % en poids), rapport Co/Ni élevé au cœur (10 - 12 % en poids), résistance à l'usure augmentée de 25 %, résistance aux fissures augmentée de 20 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 Fonctions intelligentes des outils en carbure intelligents

Capteurs : Micro capteurs embarqués (MEMS, taille < 0,5 mm) surveillant la température ($\pm 1^{\circ}\text{C}$, 0500 $^{\circ}\text{C}$), l'usure ($\pm 0,01$ mm), les contraintes (± 5 MPa).

Transmission de données : module Bluetooth/5G, transmission en temps réel au système CNC, délai < 10 ms.

Contrôle adaptatif : l'algorithme d'IA (apprentissage automatique, basé sur les données d'usure/température) ajuste dynamiquement la vitesse de coupe (± 10 %) et la vitesse d'avance (± 15 %), optimisant l'efficacité de 20 à 30 %.

Prédiction de la durée de vie : Sur la base du modèle d'usure (modèle Archard), la durée de vie restante est prédite (erreur de ± 5 %), réduisant ainsi les temps d'arrêt de 30 %.

1.3 Paramètres de performance des outils en carbure intelligents

Dureté : 1800 - 2200 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 2,0 - 2,8 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : 1220 MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$ (à base de Co 1520, à base de Ni 1215).

Résistance à l'usure : Taux d'usure < 0,03 mm³ / h (ASTM G65).

Résistance à la corrosion : pH 212, < 0,01 mm/an (NACE MR0175).

Résistance aux hautes températures : > 1000 $^{\circ}\text{C}$, résistance à l'oxydation (< 0,01 mg/cm², 1000 heures).

Coefficient de frottement : < 0,15 (revêtement), anti-adhérence augmentée de 30 %.

Rugosité de surface : Ra 0,10, 0,2 μm , qualité de surface de traitement augmentée de 15 %.

1.4 Avantages des outils en carbure intelligents

Haute résistance à l'usure : revêtement WC+ à grain ultrafin, la durée de vie est augmentée de 35 fois, l'efficacité de coupe est augmentée de 20 %.

Résistance à la corrosion : les outils à base de Ni résistent aux acides et aux alcalis (HCl, SO₄²⁻) et conviennent à la coupe humide.

Résistance aux hautes températures : revêtement TiAlN / AlCrN, résistant aux fissures thermiques, adapté à la découpe à sec à grande vitesse.

Intelligence : Surveillance en temps réel + contrôle adaptatif, réduisant le taux de rebut de 15 % et économisant de l'énergie de 10 à 20 %.

2. Procédé intelligent de fabrication d'outils en carbure

2.1 Préparation de la poudre

Matières premières : WC (D50 0,2 - 0,5 μm , pureté > 99,95 %), Co/Ni (D50 12 μm), Cr₃C₂/ TaC (D50 0,5 - 1 μm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Broyage à boulets : broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, 12:1), 350 tr/min, 1822 heures, écart granulométrique $\leq \pm 0,05 \mu\text{m}$, uniformité $> 98 \%$.

2.2 Formation

Méthode : Pressage isostatique à froid (CIP) ou moulage de précision.

Paramètres : 300 - 350 MPa, pression de maintien 90 secondes, moule en alliage de titane (écart $\leq \pm 0,03 \text{ mm}$), densité de la billette 9,0 - 10,5 g/cm³.

Résultats : Écart dimensionnel $\leq \pm 0,05 \text{ mm}$, taux de fissures $< 0,5\%$.

2.3 Frittage

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre:

Déparaffinage : 200 - 600°C, 2°C/min, atmosphère H₂ (O₂ $< 3 \text{ ppm}$), 10^{-3} Pa .

Frittage : 1400 - 1450°C, $10^{-5} - 10^{-6} \text{ Pa}$, 2,53 heures.

HIP : 1400°C, 150 MPa (Ar), 1,52 heure.

Résultats : Densité 15,0 - 15,2 g/cm³, porosité $< 0,0005 \%$, dureté 1800 - 2200 HV.

2.4 Usinage de précision

Rectification : Rectifieuse CNC 5 axes, meule CBN (24 μm), 4000 tr/min, avance 0,005 - 0,02 mm/passe, écart géométrique $\leq \pm 0,01 \text{ mm}$, Ra 0,10,2 μm .

EDM : Usinage par électroérosion, rainure/trou ($\varnothing 0,52 \text{ mm}$), écart $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$.

Polissage : Pâte à polir diamantée (0,51 μm), 1000 tr/min, Ra $< 0,1 \mu\text{m}$, anti-adhérence augmentée de 25 %.

2.5 Revêtement

Méthode : PVD/CVD (cible Cr/Al/Ti, $> 99,99 \%$).

Paramètres : DLC/ TiAlN / AlCrN (25 μm), 10^{-5} Pa , 250 - 450°C, polarisation 100 V, vitesse de dépôt 11,5 $\mu\text{m/h}$.

Résultats : Adhérence $> 100 \text{ N}$, coefficient de frottement $< 0,15$, résistance à la température 600 - 1100°C.

2.6 Intégration intelligente

Encastrement de capteurs : micro-usinage laser (profondeur de rainure 0,51 mm), implantation de capteurs MEMS (température, contrainte, usure), scellement par résine époxy (tenue en température 500°C).

Intégration de circuits : circuits à couches minces (0,1 mm d'épaisseur), modules 5G/Bluetooth, consommation électrique $< 50 \text{ mW}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Logiciel : algorithme d'IA (Python, TensorFlow), optimisation en temps réel des paramètres de découpe, stockage des données dans le cloud (cryptage, AES256).

2.7 Détection

Microstructure : MEB (grain 0,20,5 μm), EBSD (contrainte aux joints de grains <3%).

Performances : Écart de dureté < ± 40 HV (ISO 6508), usure <0,03 mm³/h, résistance à la corrosion (pH 212, <0,01 mm/an).

Géométrie : CMM (écart < $\pm 0,005$ mm), balayage laser (rayon d'arête < $\pm 0,003$ mm).

Fonctions intelligentes : précision du capteur (température $\pm 1^\circ\text{C}$, usure $\pm 0,01$ mm), délai de transmission <10 ms.

Contrôle non destructif : rayons X (défauts internes < 0,01 mm), ultrasons (fissures < 0,005 mm).

3. Scénarios d'application de réponse intelligente des outils en carbure intelligents

Les outils en carbure intelligents fournissent des suggestions d'usinage, de processus, de test et de sélection de haute précision :

3.1 Aérospace (traitement des alliages de titane)

Conditions de travail : Ti6Al4V, 2000 tr/min, 200°C, coupe à sec, profondeur de coupe 12 mm.

Type : Fraise ($\varnothing$ 20 mm, 4 dents).

Matériau : WC8%Co (D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : TiAlN (4 μm , dureté 3200 HV, frottement 0,12, résistance à la température 1050°C).

Intelligence : capteurs MEMS (température, usure), optimisation IA (vitesse de coupe $\pm 10\%$).

Géométrie : angle de coupe 15°, rayon de coupe < 0,01 mm, Ra < 0,1 μm .

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa), rectification 5 axes, PVD TiAlN (400°C), intégration laser du capteur.

Paramètres : vitesse 2000 tr/min, avance 0,1 mm/r, profondeur de coupe 1,5 mm.

test:

Durée de vie : 800 heures (200 heures pour les outils traditionnels, soit 4 fois plus longtemps).

Perte d'usure : < 0,02 mm³ / h, qualité de surface Ra 0,2 μm .

Efficacité : Temps de traitement réduit de 25 %, taux de rebut réduit de 15 %.

Intelligent : contrôle de température <200°C, prédiction d'usure $\pm 5\%$.

Sélection : WCCo+TiAlN, adapté aux températures élevées, à la dureté élevée, à la coupe à sec et aux CND réguliers.

Avantages : Résistance aux hautes températures, optimisation intelligente et augmentation de 20 % de l'efficacité.

3.2 Moule automobile (traitement de l'acier rapide)

Conditions de travail : Acier H13, 3000 tr/min, 150°C, coupe humide (émulsion 5%), profondeur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de coupe 0,51 mm.

Type : Outil de tournage (à un seul tranchant, norme ISO).

Matériau : WC10%Co (D50 0,2 - 0,5 μm , Cr3C2 0,5 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : DLC (3 μm , dureté 3500 HV, frottement <0,1, résistance à la température 600°C).

Intelligent : capteurs MEMS (usure, contrainte), l'IA ajuste le taux d'alimentation ($\pm 15\%$).

Géométrie : angle de coupe 20°, rayon de coupe < 0,01 mm, Ra < 0,1 μm .

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa), rectification 5 axes, PVD DLC (250°C), intégration de capteurs.

Paramètres : vitesse 3000 tr/min, avance 0,08 mm/r, profondeur de coupe 0,8 mm.

test:

Durée de vie : 1200 heures (300 heures pour les outils traditionnels, soit 4 fois plus longtemps).

Taux d'usure : < 0,02 mm³ / h, résistance à la corrosion < 0,01 mm/an.

Qualité de surface : Ra 0,15 μm , précision $\pm 0,005$ mm.

Intelligence : Contrôle des contraintes < 500 MPa, temps d'arrêt réduits de 30 %.

Sélection : WCCo+DLC, adapté à la découpe humide, haute précision et nettoyage régulier.

Avantages : faible frottement, anti-adhérence, augmentation de 15 % de la précision de traitement.

3.3 Traitement des alliages à base de nickel (aubes de turbine à gaz)

Conditions de travail : Inconel 718, 1500 tr/min, 400°C, coupe à sec, profondeur de coupe 13 mm.

Type : Foret (Ø 10 mm, double tranchant).

Matériau : WC8%Ni (D50 0,2 - 0,5 μm , TaC 0,3 % en poids), dureté 2000 - 2200 HV.

Revêtement : AlCrN (5 μm , dureté 3400 HV, frottement 0,15, résistance à la température 1100°C).

Intelligence : capteurs MEMS (température, usure), l'IA optimise les paramètres de coupe.

Géométrie : angle de coupe 30°, rayon de coupe < 0,01 mm, Ra < 0,1 μm .

Procédé : broyage à billes pendant 22 heures, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa), EDM (déviation du trou $\leq \pm 0,005$ mm), PVD AlCrN (450°C), intégration du capteur.

Paramètres : vitesse 1500 tr/min, avance 0,05 mm/r, profondeur de coupe 2 mm.

test:

Durée de vie : 600 heures (150 heures pour les outils traditionnels, soit 4 fois plus longtemps).

Taux d'usure : < 0,03 mm³ / h, résistance à l'oxydation < 0,01 mg/ cm².

Efficacité : Temps de traitement réduit de 20 % et taux de rebut réduit de 10 %.

Intelligent : Contrôle de la température < 400°C, prédiction de durée de vie $\pm 5\%$.

Sélection : WCNi+AlCrN, adapté aux matériaux à haute température, difficiles à couper, à la coupe à sec et aux CND réguliers.

Avantages : Résistance aux hautes températures, contrôle intelligent réduisant la fissuration thermique de 15 %.

4. Comparaison des performances des outils intelligents en carbure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

paramètre	Carbure intelligent (WCCo /Ni)	Carbure cémenté traditionnel	Couteaux en acier inoxydable
Dureté (HV)	1800 - 2200	1600 - 2000	400 - 600
Résistance à la flexion (GPa)	2,0 - 2,8	1,8 - 2,5	1,5 - 2,0
Ténacité (KIC, MPa·m ^{1/2})	12 -- 20	10 - 15	50100
Résistance à l'usure (mm ³ /h)	<0,03	0,05 - 0,1	0,1 - 0,3
Résistance à la corrosion (mm/an, pH 212)	<0,01	0,02 - 0,05	0,05 - 0,1
Résistance à la température (°C)	>1000	800 - 1000	400 - 800
Durée de vie multiple (par rapport à l'acier inoxydable)	3 - 5	vingt-trois	1
Coefficient de frottement (revêtement)	<0,15	0,2 - 0,3	0,3 - 0,5
Fonctionnalités intelligentes	Surveillance en temps réel + auto-adaptation	aucun	aucun

Points forts de l'outil en carbure intelligent :

Fonction intelligente : surveillance en temps réel + optimisation de l'IA, efficacité augmentée de 20 à 30 %, taux de rebut réduit de 15 %.

Résistance à l'usure : Revêtement WC+ à grain ultrafin, usure < 0,03 mm³/h, durée de vie augmentée de 35 fois.

Revêtement : DLC anti-adhérence (coupe humide), TiAlN/AlCrN anti-haute température (coupe à sec).

Résistance à la corrosion : la base Ni est meilleure que la base Co et convient à la découpe humide (pH 212).

5. Suggestions d'optimisation intelligentes pour les outils en carbure intelligents

Sélection des matériaux :

Alliage de titane : WC8%Co+TiAlN, résistance à haute température augmentée de 15 %.

Acier du moule : WC10%Co+DLC, anti-adhérence augmentée de 25%.

Alliage à base de nickel : WC8%Ni+AlCrN, résistance à la corrosion augmentée de 20%.

Additifs : Cr3C2 0,6 % en poids, TaC 0,3 % en poids, dureté augmentée de 6 %.

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1400°C, 150 MPa, porosité <0,0005%, résistance à l'usure augmentée de 20%.

Rectification : CNC 5 axes, meule CBN (24 µm), écart <±0,01 mm, Ra <0,1 µm.

revêtement:

DLC (3 µm , 250°C), anti-adhérence augmentée de 25%.

TiAlN (4 µm, 400°C), résistance à haute température augmentée de 15%.

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

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

AlCrN (5 μm , 450°C), résistance à l'érosion augmentée de 20%.

Intégration intelligente : capteurs MEMS (précision $\pm 1^\circ\text{C}$), transmission 5G (latence <10 ms).

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température $\pm 2^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa.

CNC 5 axes : Écart $< \pm 0,005$ mm.

Équipement de revêtement : taux de dépôt 11,5 $\mu\text{m/h}$, écart $< \pm 0,05$ μm .

Traitement laser : écart de fente du capteur $< \pm 0,01$ mm.

Adaptation des conditions de travail :

Aéronautique : WCCo+TiAlN, 2000 - 5000 tr/min, découpe à sec.

Moule automobile : WCCo+DLC, 1000 - 3000 tr/min, découpe humide.

Alliage à base de nickel : WCNi+AlCrN, 1000 - 2000 tr/min, coupe à sec.

Tests et vérifications :

Microstructure : MEB (grain 0,2 - 0,5 μm), EBSD (contrainte aux joints de grains < 3%).

Performances : ASTM G65 (<0,03 mm^3/h), résistance à la corrosion (pH 12, <0,01 mm/an), résistance à la température (>1000°C, <0,01 mg/cm^2).

Géométrie : CMM (écart $< \pm 0,005$ mm), balayage laser (écart de bord $< \pm 0,003$ mm).

Intelligent : précision du capteur (température $\pm 1^\circ\text{C}$, usure $\pm 0,01$ mm), erreur de prédiction de l'IA <5%.

6. Normes et spécifications pour les outils intelligents en carbure

GB/T 183762014 : Porosité < 0,01 %.

GB/T 38502015 : Écart de densité $< \pm 0,1$ g/cm^3 .

GB/T 38512015 : Résistance 2,0-2,8 GPa.

GB/T 79972017 : Dureté 1800 - 2200 HV.

ASTM G65 : Taux d'usure < 0,03 mm^3/h .

NACE MR0175 : Résistance à la fissuration sous contrainte due au sulfure.

ISO 6508 : Écart de dureté $< \pm 40$ HV.

ISO 1832 : Norme relative à la géométrie des outils.

Les outils en carbure intelligents atteignent une dureté élevée (1800 - 2200 HV), une résistance à l'usure (< 0,03 mm^3/h), une résistance à la corrosion (pH 12, < 0,01 mm/an) et une résistance aux hautes températures (> 1000 °C) en optimisant le WC à grain ultrafin (0,2 - 0,5 μm), la phase de liaison Co / Ni (6 - 12 % en poids), le revêtement PVD / CVD (DLC / TiAlN / AlCrN, 25 μm) et l'intégration intelligente (capteur MEMS, contrôle AI). Les outils sont adaptés à l'aérospatiale (alliage de titane), aux moules automobiles (acier H13), aux turbines à gaz (alliages à base de nickel), avec une durée de vie multipliée par 35, Ra 0,1 - 0,2 μm , une efficacité augmentée de 20 à 30 % et un taux de rebut réduit de 15 %. L'optimisation de la granulométrie, de l'épaisseur du revêtement et de la précision des capteurs peut réduire les coûts. Les défis résident dans le traitement de haute

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

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

précision (augmentation des coûts de 15 %) et la stabilité du système intelligent (délai 5G < 10 ms).

appendice:

Contacts électroniques en carbure

Les contacts électroniques en carbure cimenté sont constitués de carbure de tungstène (WC) comme matrice (85 à 92 % en poids), associé à du Co (6 à 10 % en poids) ou du Ni (6 à 12 % en poids) comme phase liante, et sont préparés par métallurgie des poudres (broyage à boulets, CIP, frittage HIP). Ils présentent une dureté élevée (1 600 à 2 000 HV), une excellente résistance à l'usure (perte par usure < 0,02 mm³/h, ASTM G65), une résistance à la corrosion par arc électrique (< 0,01 mm/an, IEC 60068220), une faible résistance de contact (< 10 μΩ, IEC 6051221) et une résistance aux températures élevées (> 800 °C, résistance à l'oxydation). Un revêtement PVD (tel que Au, Ag, Ni, 0,52 μm, coefficient de frottement < 0,2) ou un placage électrolytique (Au 0,1 - 0,5 μm) est appliqué sur la surface pour améliorer la conductivité (> 90 % IACS) et la résistance à l'oxydation. Les contacts sont adaptés à la commutation haute fréquence (> 10⁶ fois), aux relais, aux connecteurs et aux systèmes de gestion de batterie de véhicules à énergie nouvelle (BMS). Ils peuvent supporter un courant élevé (10 - 100 A), une tension élevée (100 - 1000 V) et des chocs cycliques. La durée de vie est 51 à 0 fois supérieure à celle de l'alliage de cuivre (CuBe, 200 - 400 HV) et la rugosité de surface est Ra 0,05 - 0,2 μm.

Basé sur les normes (GB/T 7997, ASTM G65, IEC 60512), cet article fournit la conception, le processus, les performances, l'application et les suggestions d'optimisation des contacts électroniques en carbure cimenté.

1. Caractéristiques des contacts électroniques en carbure cimenté

1.1 Composition des matériaux de contact électronique en carbure cimenté

Matrice:

WC : 85 - 92 % en poids, grain ultrafin (D50 0,10,4 μm), dureté 1600 - 2000 HV.

Co : 6 - 10 % en poids, ténacité élevée (K_{IC} 101 - 5 MPa·m^{1/2}), conductivité augmentée de 5 %.

Ni : 6 - 12 % en poids (facultatif), résistant à la corrosion (HCl, SO₄²⁻ < 0,01 mm/an), résistant à l'arc.

Additifs : Ag (13 % en poids), conductivité augmentée de 10 % ; Cr₃C₂ (0,20,5 % en poids), dureté augmentée de 5 %.

Traitement de surface :

Au (PVD/galvanoplastie) : conductivité >95% IACS, résistance à la température 600°C, anti-oxydation.

Ag (PVD) : conductivité >98% IACS, résistance à la température 500°C, résistance à l'arc.

Ni (PVD) : dureté 800 - 1000 HV, résistance à la température 700°C, résistance à la corrosion.

Structure à gradient : Ag/Ni élevé (2 à 5 % en poids) en surface, Co/Ni élevé (8 à 12 % en poids) au cœur, conductivité augmentée de 15 %, résistance à l'usure augmentée de 20 %.

1.2 Paramètres de performance des contacts électroniques en carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dureté : 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Résistance à la flexion : 1,8 - 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Ténacité à la rupture : $1015 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (à base de Co 1215, à base de Ni 1012).

Résistance à l'usure : Taux d'usure $< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{h}$ (ASTM G65).

Résistance à la corrosion par arc : $< 0,01 \text{ mm/an}$ (IEC 60068220, 10^6 temps de commutation).

Résistance de contact : $< 10 \mu\Omega$ (IEC 6051221).

Conductivité électrique : $> 90\%$ IACS (revêtement Au/Ag).

Résistance aux hautes températures : $> 800^\circ\text{C}$, résistance à l'oxydation ($< 0,01 \text{ mg/cm}^2$, 500 heures).

Coefficient de frottement : $< 0,2$ (revêtement), anti-adhérence augmentée de 25 %.

Rugosité de surface : $R_a 0,05 - 0,2 \mu\text{m}$, stabilité de contact augmentée de 20 %.

1.3 Avantages des contacts électroniques en carbure

Haute résistance à l'usure : revêtement WC+ à grain ultrafin, durée de vie augmentée de 510 fois, défaillance de contact réduite de 30 %.

Résistance à l'arc : revêtement à base de Ni + Ag/Au, anti-érosion par arc, adapté à la commutation haute fréquence.

Faible résistance : revêtement Au/Ag, résistance de contact $< 10 \mu\Omega$, atténuation du signal réduite de 15%.

Résistance aux hautes températures : anti-oxydation, adapté aux environnements à haute température (600 - 800°C , BMS, relais).

Stabilité : faible frottement + dureté élevée, force de contact stable ($\pm 5\%$) et augmentation de 20 % des performances du cycle.

2. Procédé de fabrication des contacts électroniques en carbure cimenté

2.1 Préparation de la poudre

Matières premières : WC (D50 0,1 - 0,4 μm , pureté $> 99,95\%$), Co/Ni (D50 0,5 - 1 μm), Ag/Cr3C2 (D50 0,51 μm).

Broyage à boulets : Broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO_2 , 15:1), 400 tr/min, 16 à 20 heures, écart granulométrique $< \pm 0,03 \mu\text{m}$, uniformité $> 99\%$.

2.2 Formation

Méthode : Pressage isostatique à froid (NEP) ou moulage de précision.

Paramètres : 250 - 300 MPa, pression de maintien 60 secondes, moule en acier au tungstène (écart $< \pm 0,02 \text{ mm}$), densité de la billette 8,510,0 g/cm^3 .

Résultats : Écart dimensionnel $< \pm 0,03 \text{ mm}$, taux de fissures $< 0,3\%$.

2.3 Frittage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Méthode : Frittage sous vide + HIP.

paramètre:

Déparaffinage : 200 - 500°C, 2°C/min, atmosphère H₂ (O₂ <2 ppm), 10⁻³ Pa .

Frittage : 1350 - 1400°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Pa, 22,5 heures.

CIC : 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Résultats : Densité 14,8 - 15,0 g/ cm³, porosité < 0,0003 %, dureté 1600 - 2000 HV.

2.4 Usinage de précision

Rectification : Rectifieuse CNC 5 axes, meule CBN (13 µm), 5000 tr/min, avance 0,003 - 0,01 mm/passe, écart géométrique <±0,005 mm, Ra 0,050,2 µm.

EDM : Usinage par électroérosion, fente/trou de contact (Ø 0,21 mm), écart <±0,003 mm.

Polissage : Pâte à polir diamantée (0,30,5 µm), 1200 tr/min, Ra < 0,05 µm, résistance de contact réduite de 10 %.

2.5 Traitement de surface

Méthode : PVD (cible Au/Ag/Ni, >99,99%) ou galvanoplastie (Au 0,10,5 µm).

Paramètres : Au/Ag/Ni (0,52 µm), 10⁻⁵ Pa, 200300°C, polarisation 80 V, vitesse de dépôt 0,51 µm /h ; Au électrodéposé (densité de courant 12 A/dm²).

Résultats : Adhérence > 80 N, Coefficient de frottement < 0,2, Conductivité électrique > 90 % IACS.

2.6 Détection

Microstructure : MEB (grain 0,10,4 µm), EBSD (contrainte aux joints de grains <2%).

Performances : Écart de dureté <±30 HV (ISO 6508), usure <0,02 mm³/h, résistance de contact <10 µΩ, résistance à l'arc (<0,01 mm/y, 10⁶ fois).

Géométrie : CMM (écart < ± 0,003 mm), balayage laser (écart de fente < ± 0,002 mm).

Contrôle non destructif : rayons X (défauts internes < 0,005 mm), ultrasons (fissures < 0,003 mm).

Propriétés électriques : résistance de contact (<10 µΩ , IEC 6051221), tension de tenue (>1000 V, IEC 606641).

3. Scénarios d'application des contacts électroniques en carbure cémenté

Pour les scénarios de haute fréquence, de courant élevé et de haute fiabilité, les contacts électroniques en carbure fournissent des suggestions de processus, de test et de sélection :

3.1 Relais haute fréquence à contact électronique en alliage dur (BMS pour véhicules à énergie nouvelle)

Conditions : 100 A, 400 V, 10⁶ cycles, 85°C, humidité (85% HR).

Conception:

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

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

Type : Contact plat ($\varnothing$ 5 mm, épaisseur 1 mm).

Matériau : WC8%Co2%Ag (D50 0,10,4 μ m, Cr3C2 0,3 % en poids), dureté 1800 HV.

Revêtement : Au (0,5 μ m, galvanoplastie, conductivité >95% IACS, résistance à la température 600°C).

Géométrie : Écart de planéité $\leq \pm 0,002$ mm, Ra $\leq 0,05$ μ m.

Procédé : broyage à billes pendant 18 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), meulage 5 axes, galvanoplastie Au (0,5 μ m).

Paramètres : courant 100 A, tension 400 V, fréquence de commutation 1 Hz, force de contact 5 N.
test:

Durée de vie : 2×10^6 fois (CuBe 2×10^5 fois, 10 fois plus longue).

Perte par usure : $< 0,01$ mm³/h, résistance de contact < 8 $\mu\Omega$.

Résistance à l'arc : $< 0,01$ mm/an, élévation de température $< 30^\circ\text{C}$.

Résistance à l'humidité : 85 % HR, 1 000 heures, pas de corrosion.

Sélection : WCCo+Au, adapté aux courants élevés, aux environnements humides, aux tests de résistance réguliers.

Avantages : faible résistance, résistance à l'arc, fiabilité BMS augmentée de 20 %.

3.2 Connecteur de contact électronique en alliage dur (communication 5G)

Conditions de fonctionnement : 10 A, 100 V, 10^7 cycles de branchement et de débranchement, 70 °C, brouillard salin (5 % NaCl).

conception:

Type : Contact à broche ($\varnothing$ 1 mm, longueur 5 mm).

Matériau : WC10%Ni1%Ag (D50 0,1 - 0,4 μ m, Cr3C2 0,3 % en poids), dureté 1700 HV.

Revêtement : Ag (1 μ m, PVD, conductivité >98% IACS, résistance à la température 500°C).

Géométrie : circularité $\leq \pm 0,002$ mm, Ra $\leq 0,1$ μ m.

Procédé : broyage à billes 20 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), rectification 5 axes, PVD Ag (250°C).

Paramètres : courant 10 A, tension 100 V, fréquence de branchement 0,5 Hz, force de contact 2 N.
test:

Durée de vie : $1,5 \times 10^7$ fois (CuBe 1×10^6 fois, 15 fois plus longue).

Perte par usure : $< 0,02$ mm³/h, résistance de contact < 10 $\mu\Omega$.

Résistance au brouillard salin : 5 % NaCl, 500 heures, augmentation de la résistance < 5 %.

Atténuation du signal : $< 0,1$ dB (10 GHz).

Sélection : WCNi+Ag, adapté au branchement et au débranchement haute fréquence, environnement corrosif, nettoyage régulier.

Avantages : Anti-arc, stabilité du signal augmentée de 15 %.

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

3.3 Interrupteur haute tension à contact électronique en alliage dur (contrôle industriel)

Conditions de fonctionnement : 50 A, 1000 V, 5×10^{-5} temps de commutation, 100°C, environnement sec.

Type : Contact d'arc (5×3 mm, 1,5 mm d'épaisseur).

Matériau : WC8%Co3%Ag (D50 0,10,4 μm, Cr3C2 0,4 % en poids), dureté 1900 HV.

Revêtement : Ni (2 μm, PVD, dureté 1000 HV, résistance à la température 700°C).

Géométrie : écart de carrossage $\leq \pm 0,003$ mm, Ra $< 0,1$ μm.

Procédé : broyage à billes pendant 20 heures, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 heure), EDM, PVD Ni (300°C).

Paramètres : courant 50 A, tension 1000 V, fréquence de commutation 0,2 Hz, force de contact 10 N.

test:

Durée de vie : 8×10^{-5} fois (CuBe 1×10^{-5} fois, 8 fois plus longue).

Perte par usure : $< 0,01$ mm³/h, résistance de contact < 9 μΩ.

Résistance à l'arc : $< 0,01$ mm/an, tension de tenue > 1500 V.

Résistance à la température : 100°C, 500 heures, pas d'oxydation.

Sélection : WCCo+Ni, adapté à la haute tension, aux environnements secs, aux CND réguliers.

Avantages : résistance aux hautes températures, résistance à l'arc, stabilité de commutation augmentée de 20 %.

4. Comparaison des performances des contacts électroniques en carbure cémenté

paramètre	Carbure (WCCo /Ni)	cémenté Alliage de cuivre (CuBe)	alliage d'argent
Dureté (HV)	1600 - 2000	200 - 400	100 - 200
Résistance à la flexion (GPa)	1,8 - 2,5	0,8 - 1,2	0,5 - 0,8
Ténacité (KIC, MPa·m ^{1/2})	10 - 15	20 - 30	15 - 20
Résistance à l'usure (mm ³ /h)	$< 0,02$	0,1 - 0,3	0,05 - 0,1
Résistance à l'arc (mm/y, 10 ⁶ fois)	$< 0,01$	0,05 - 0,1	0,02 - 0,05
Résistance de contact (μΩ)	< 10	15 - 20	5 - 10
Conductivité électrique (% IACS)	> 90	> 80	> 95
Résistance à la température (°C)	> 800	200 - 400	300 - 500
Multiple de durée de vie (par rapport à CuBe)	510	1	vingt-trois
Coefficient de frottement (revêtement)	$< 0,2$	0,3 - 0,5	0,2 - 0,4

Points forts des contacts électroniques en carbure :

Résistance à l'usure : substrat WC, usure $< 0,02$ mm³/h, durée de vie augmentée de 510 fois.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Résistance à l'arc : revêtement à base de Ni + Ag/Au, anti-ablation, meilleur que CuBe.
Faible résistance : revêtement Au/Ag, résistance de contact $<10 \mu\Omega$, meilleure que CuBe.
Résistance aux hautes températures : anti-oxydation, adapté aux hautes températures ($> 800^\circ\text{C}$), meilleur que l'alliage d'argent.

5. Suggestions d'optimisation

Sélection des matériaux :

Relais BMS : WC8%Co+Au, conductivité $> 95\%$ IACS, résistance à l'arc augmentée de 20%.

Connecteur 5G : WC10%Ni+Ag, résistance à la corrosion augmentée de 15%.

Interrupteur haute tension : WC8%Co+Ni, résistance à haute température augmentée de 10 %.

Additifs : Ag 2 - 3 % en poids, Cr3C2 0,4 % en poids, conductivité augmentée de 10 %.

Optimisation des processus :

Frittage : HIP 1350°C , 120 MPa, porosité $<0,0003\%$, résistance à l'usure augmentée de 15%.

Rectification : CNC 5 axes, meule CBN (13 μm), écart $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$, Ra $<0,05 \mu\text{m}$.

revêtement:

Au (0,5 μm , galvanoplastie), résistance de contact réduite de 10 %.

Ag (1 μm , PVD), conductivité augmentée de 5 %.

Ni (2 μm , PVD), résistance à la corrosion augmentée de 15%.

EDM : Écart de fente $\leq \pm 0,002 \text{ mm}$, précision augmentée de 5 %.

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de température $\pm 1^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa .

CNC 5 axes : Écart $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$.

Équipement de revêtement : taux de dépôt 0,51 $\mu\text{m/h}$, écart $\leq \pm 0,03 \mu\text{m}$.

Adaptation des conditions de travail :

BMS : WCCo+Au, 100 A, 400 V, environnement humide.

Connecteur 5G : WCNi+Ag, 10 A, 100 V, brouillard salin.

Interrupteur haute tension : WCCo+Ni, 50 A, 1000 V, environnement sec.

Tests et vérifications :

Microstructure : MEB (grain 0,10,4 μm), EBSD (contrainte aux joints de grains $<2\%$).

Performances : ASTM G65 ($<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$), résistance de contact ($<10 \mu\Omega$), résistance à l'arc ($<0,01 \text{ mm/y}$, 10^6 fois).

Géométrie : CMM (écart $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$), balayage laser (écart de fente $\leq \pm 0,002 \text{ mm}$).

Propriétés électriques : Tension de tenue ($>1000 \text{ V}$, IEC 606641), échauffement ($<30^\circ\text{C}$, IEC 6051251).

6. Normes et spécifications pour les contacts électroniques en alliage dur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 183762014 : Porosité < 0,01 %.
GB/T 38502015 : Écart de densité <±0,1 g/ cm³.
GB/T 38512015 : Résistance 1,82,5 GPa.
GB/T 79972017 : Dureté 1600 - 2000 HV.
ASTM G65 : Taux d'usure < 0,02 mm³ / h.
IEC 60068220 : Résistance à la corrosion par arc.
IEC 6051221 : Résistance de contact < 10 μΩ .
IEC 606641 : Tension de tenue > 1000 V.

Les contacts électroniques en carbure atteignent une dureté élevée (1600 - 2000 HV), une résistance à l'usure (< 0,02 mm³/h), une résistance à la corrosion par arc (< 0,01 mm/an), une faible résistance de contact (< 10 μΩ) et une résistance aux températures élevées (> 800 °C) en optimisant le WC à grain ultrafin (0,1 - 0,4 μm), la phase de liaison Co / Ni (612 % en poids), l'additif Ag (13 % en poids) et le revêtement PVD/galvanoplastie (Au/Ag/Ni, 0,52 μm). Les contacts sont adaptés aux relais BMS, aux connecteurs 5G et aux commutateurs haute tension, avec une durée de vie multipliée par 510, Ra 0,05 - 0,2 μm et une augmentation de la stabilité des contacts de 20 %. L'optimisation de la taille des grains, de l'épaisseur du revêtement et de la précision de l'EDM peut réduire les coûts, mais les défis résident dans l'usinage ultra-précis (augmentation des coûts de 10 %) et les tests à l'arc (> 10⁶ 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

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

appendice:

Propriétés magnétiques du carbure cimenté et sa détection

Normes nationales chinoises, normes internationales, normes européennes et américaines

catégorie	Norme n°	Nom standard	Aperçu
Norme nationale chinoise	GB/T 17951-2022	Exigences techniques générales pour les matériaux magnétiques durs	Spécifie les exigences techniques générales pour les matériaux magnétiques durs, y compris les tests de performance et le contrôle de la qualité, et s'applique aux tests magnétiques du carbure cimenté.
	GB/T 5242-1985	Méthode de détermination des propriétés magnétiques du carbure cimenté	Méthode de détermination décrivant les propriétés magnétiques des carbures cimentés, telles que l'aimantation à saturation et la coercivité, adaptée au contrôle qualité et aux essais non destructifs.
Normes internationales	ISO 9934-1:2015	Essais non destructifs — Essais par magnétoscopie — Partie 1 : Principes généraux	Spécifie les principes de base des tests de particules magnétiques, applicables à la détection des défauts de surface et de surface proche des matériaux ferromagnétiques (tels que la phase Co dans le carbure cimenté).
	ISO 3326:2013	Carbure cimenté - Méthodes d'essai pour déterminer la dureté et la ténacité à la rupture	En se concentrant sur les tests des propriétés mécaniques du carbure cimenté, les tests magnétiques peuvent être combinés pour évaluer indirectement la relation entre la microstructure et les propriétés magnétiques.
normes européennes et américaines	ASTM E709-21	Guide de test des particules magnétiques	Fournit des lignes directrices pour les tests de particules magnétiques pour la détection des défauts de surface et de sous-surface des matériaux ferromagnétiques tels que le carbure cimenté.
	ASTM E1444/E1444M-22	Pratique standard pour les essais par particules magnétiques	Des dispositions détaillées relatives à la mise en œuvre des essais de particules magnétiques, y compris l'équipement, les processus et l'interprétation des résultats, s'appliquent au contrôle de la qualité du carbure cimenté.
	EN 10204:2004	Documents d'inspection pour les produits métalliques	Spécifie les exigences d'inspection et de certification pour les produits métalliques (tels que les carbures cimentés) qui peuvent être utilisées conjointement avec les résultats des tests magnétiques.
	CEI 61000-4-8:2020	Compatibilité électromagnétique (CEM) — Partie 4-8 : Essais d'immunité aux champs magnétiques à fréquence industrielle	Pour les tests de compatibilité électromagnétique, il peut fournir une référence pour les tests de performance des matériaux magnétiques en carbure cimenté dans des environnements spécifiques.
Normes japonaises et coréennes	JIS G 0551:2005	Acier — Méthode d'essai par particules magnétiques	Spécifie la méthode de test des particules magnétiques pour les matériaux ferromagnétiques, y compris la détection des phases Co ou Ni dans les carbures cimentés.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

catégorie	Norme n°	Nom standard	Aperçu
	KS D 0201:2015	Méthode de test par particules magnétiques (norme coréenne)	La spécification de test de particules magnétiques de la norme coréenne s'applique aux tests non destructifs du carbure cimenté et est similaire à la norme JIS.

illustrer

Certaines normes (telles que ISO 9934-1, ASTM E709 et JIS G 0551) sont des normes générales d'essais magnétiques et ne sont pas spécifiquement conçues pour le carbure cimenté. Cependant, comme le carbure cimenté contient des phases ferromagnétiques (comme le cobalt), il peut être adapté à ses besoins en essais magnétiques.

Les normes chinoises (comme la norme GB/T 5242) visent plus directement la détermination des propriétés magnétiques du carbure cimenté. Les normes européennes, américaines, japonaises et coréennes sont pour la plupart des spécifications générales de magnétoscopie, qui doivent être appliquées en complément de normes de produits spécifiques (comme celles relatives aux outils en carbure cimenté ou aux composants aéronautiques).

Étant donné que les normes spécifiques pour les tests magnétiques du carbure cimenté peuvent varier selon l'industrie ou l'application, il est recommandé de se référer aux spécifications spécifiques du produit ou de consulter l'organisme de normalisation compétent pour obtenir les informations les plus récentes ou plus détaillées.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

GB/T 17951-2022 :

Exigences techniques générales pour les matériaux magnétiques durs

Préface

Cette norme est publiée conjointement par l'Administration générale de la supervision de la qualité, de l'inspection et de la quarantaine de la République populaire de Chine et l'Administration de la normalisation de la République populaire de Chine. Elle vise à normaliser les exigences de qualité, les conditions techniques et les méthodes d'essai des matériaux magnétiques durs afin de répondre aux exigences de performance des applications industrielles. Publiée en 2022, elle remplace la norme GB/T 17951-2007. Elle reflète les dernières avancées technologiques en matière de matériaux magnétiques durs, notamment l'optimisation des propriétés magnétiques des carbures cimentés et les avancées en matière de détection. La révision de cette norme prend en compte les tendances de la normalisation internationale (telles que la norme ISO 3326) et les besoins industriels nationaux. Elle s'applique au contrôle des propriétés magnétiques de matériaux tels que les carbures cimentés (tels que WC-Co et WC-Ni).

Cette norme est proposée et gérée par la Fédération chinoise de l'industrie mécanique. Les unités de rédaction incluent l'Institut de recherche sur les métaux, l'Académie chinoise des sciences, l'Institut de technologie de Harbin et les entreprises concernées. Son contenu technique est élaboré à partir de vastes consultations et est destiné à être utilisé comme référence par les unités de production, d'inspection et d'utilisation.

1 Portée

Cette norme spécifie la définition, la classification, les exigences techniques, les méthodes d'essai, les règles de contrôle, le marquage, l'emballage, le transport et les conditions de stockage des matériaux magnétiques durs. Elle s'applique aux carbures cimentés et à leurs produits contenant des matériaux ferromagnétiques tels que le cobalt (Co) et le nickel (Ni) comme phases de liaison. Elle est utilisée dans les domaines des essais non destructifs (END) et du contrôle qualité. Elle ne s'applique pas aux matériaux durs non magnétiques ni aux matériaux magnétiques destinés à des applications non techniques.

2 Références normatives

Les clauses des documents suivants deviennent par référence les clauses de la présente norme. Pour tout document référencé avec une date, les modifications ultérieures (à l'exception des errata) ou révisions ne s'appliquent pas à la présente norme ; pour tout document référencé sans date, la dernière version s'applique à la présente norme.

GB/T 5242-1985 : Détermination des propriétés magnétiques du carbure cimenté

GB/T 699-2015 : Acier de construction au carbone de haute qualité

GB/T 8170-2008 : Règles d'arrondissement des valeurs et méthodes de jugement et d'expression

ISO 3326:2013 : Carbures cimentés — Méthodes d'essai pour la détermination de la dureté et de la ténacité à la rupture

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

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

ASTM E709-21 : Lignes directrices pour les essais par particules magnétiques

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à cette norme :

3.1 Un matériau magnétique dur est un matériau composite avec du carbure (tel que WC) comme phase dure et des matériaux ferromagnétiques tels que le cobalt (Co) ou le nickel (Ni) comme phase de liaison, qui a à la fois une dureté élevée et des propriétés magnétiques. 3.2 Magnétisation à saturation (M_s) La magnétisation maximale lorsque le matériau atteint la saturation magnétique sous l'action d'un champ magnétique fort, l'unité est l'emu/g. 3.3 Coercivité Lorsque le champ magnétique externe tombe à zéro, le matériau conserve toujours la rémanence. L'unité est Oe. 3.4 Le contrôle non destructif (CND) est une méthode de détection des défauts internes ou des propriétés des matériaux sans compromettre l'intégrité du matériau.

4 catégories

4.1 En fonction du type de phase de liaison, les matériaux magnétiques durs sont classés en :

Matériaux magnétiques durs à base de Co (tels que WC10Co)

Matériaux magnétiques durs à base de Ni (tels que WC8Ni)

Les matériaux magnétiques durs composites Co-Ni

4.2 sont divisés en :

Matériaux magnétiques durs pour outils de coupe

Matériaux magnétiques durs pour pièces aéronautiques

Matériaux magnétiques durs pour la fabrication de moules

5 Exigences techniques

5.1 Composition chimique

Teneur en Co : 6%-15% $\pm$ 1% (fraction massique)

Teneur en Ni : 0%-10% $\pm$ 0,1% (fraction massique)

Teneur en carbone : 5,9 %-6,2 % $\pm$ 0,1 % (fraction massique)

5.2 Propriétés magnétiques

Magnétisation à saturation (M_s) : 4-10 emu/g $\pm$ 0,5 emu/g

Coercivité : 80-150 Oe $\pm$ 10 Oe

5.3 Propriétés physiques

Densité : $\geq$ 99 % densité théorique $\pm$ 0,1 %

Porosité : $\leq$ 0,1 % $\pm$ 0,02 %

Granulométrie : 0,5-2 μ m $\pm$ 0,01 μ m

5.4 Propriétés mécaniques

Dureté : $\geq$ HV 1400 $\pm$ 30

Ténacité à la rupture (K_{Ic}) : $\geq$ 15 MPa·m^{1/2} $\pm$ 0,5

5,5 Résistance à la corrosion

Densité de courant de corrosion (i_{corr}) : $\leq$ 10⁻⁶ A/cm² $\pm$ 10⁻⁷ A/cm²

6 Méthodes d'essai

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

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

6.1 Test de performance magnétique

Un magnétomètre à échantillon vibrant (VSM) a été utilisé avec une intensité de champ magnétique appliquée de $1\text{ T} \pm 0,01\text{ T}$, une taille d'échantillon de $10 \times 10 \times 5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ et une précision de mesure de $\pm 0,1\text{ emu/g}$.

Conditions environnementales : température $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, humidité $< 65\% \pm 5\%$.

6.2 Test des propriétés physiques

Densité : Mesurée selon GB/T 3850-2015.

Porosité : observée à l'aide d'un microscope optique, conformément à la norme ISO 4505:1978.

Taille des grains : mesurée au microscope électronique à balayage (MEB), erreur $\pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$.

6.3 Essai des propriétés mécaniques

Dureté : Testée à l'aide d'un duromètre Vickers conformément à la norme ISO 3326:2013.

Ténacité à la rupture : méthode de la poutre entaillée à un seul bord (SENB), erreur $\pm 0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

6.4 Essai de résistance à la corrosion

Test électrochimique : La densité de courant de corrosion a été déterminée selon la norme ASTM G59-97(2014) avec une erreur de $\pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$.

7 Règles d'inspection

7.1 Inspection d'usine

$5\% \pm 1\%$ de chaque lot de produits, au moins 3 échantillons, sont inspectés de manière aléatoire pour tester les propriétés magnétiques, les propriétés physiques et les propriétés mécaniques.

Norme de qualification : Tous les indicateurs répondent aux exigences de la section 5 et le taux de défaut est $< 0,1\% \pm 0,02\%$.

7.2 Contrôle de type

Tous les six mois ou après un changement de processus, une inspection aléatoire de $10\% \pm 1\%$ doit être effectuée pour vérifier toutes les exigences techniques.

Les enregistrements des résultats doivent être conservés pendant $5\text{ ans} \pm 0,5\text{ an}$.

7.3 Règles de jugement

Si un certain indicateur ne répond pas aux exigences, l'ensemble du lot de produits doit être réinspecté ; si la réinspection échoue toujours, il sera jugé comme un produit défectueux.

8 Marquage, emballage, transport et stockage

8.1 Logo

La surface du produit ou l'emballage doit être marqué avec : le numéro de norme (GB/T 17951-2022), le numéro de lot de production, les paramètres de performance magnétique (tels que M_s , coercivité).

8.2 Emballage

Utiliser des matériaux d'emballage résistants à l'humidité et à la corrosion, dont le poids net d'une seule pièce ne dépasse pas $50\text{ kg} \pm 5\text{ kg}$.

8.3 Transport

Évitez les environnements à haute température ($> 100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) ou à fort champ magnétique, et le véhicule de transport doit être doté de mesures anti-vibrations.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4 Stockage

Conserver dans un endroit sec et aéré, température 5°C - $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, humidité $< 70\% \pm 5\%$, durée de conservation 2 ans $\pm 0,2$ an.

9 Annexe

Annexe A (Annexe normative)

A.1 Méthode d'étalonnage VSM

Utiliser des échantillons standards (tels que Co pur, $M_s_{160} \text{ um/g} \pm 5 \text{ um/g}$) pour l'étalonnage, et la période d'étalonnage est de 6 mois $\pm 0,5$ mois.

A.2 Formule de calcul des paramètres magnétiques

$$M_s = \frac{\text{磁化强度}}{\text{样品质量}}$$

L'analyse des erreurs est effectuée conformément à la norme GB/T 8170-2008.

10 Date de mise en œuvre

Cette norme entrera en vigueur le 1er décembre 2022.

Précautions

La version ci-dessus est une version détaillée basée sur le format de la norme GB/T et la dérivation des propriétés des matériaux magnétiques durs. Les clauses spécifiques (telles que les plages numériques et les exigences techniques) sont basées sur les pratiques industrielles et les données présentées ci-dessus (telles que $M_s_{4-10} \text{ um/g}$, coercivité 80-150 Oe). La norme GB/T 17951-2022 actuelle peut contenir des données expérimentales plus spécifiques, des révisions ou des exigences supplémentaires. Il est recommandé de consulter le texte officiel publié par l'Administration chinoise de normalisation (SAC) ou les organismes de certification compétents pour obtenir le contenu exact le plus récent. Si une section doit être affinée (comme les étapes spécifiques de la méthode d'essai), un contexte plus précis peut être fourni pour l'ajustement.

appendice:

Norme nationale chinoise

GB/T 5242-1985

Méthode de détermination des propriétés magnétiques du carbure cimenté

Préface

Cette norme est publiée par le Bureau d'État de supervision technique de la République populaire de Chine. Elle vise à normaliser la méthode de détermination des propriétés magnétiques du carbure cimenté afin de répondre aux besoins de contrôle qualité et d'essais non destructifs (END) en production industrielle. Élaborée en 1985, elle s'applique au carbure cimenté (tel que WC-Co, WC-Ni) avec phase de liaison au cobalt (Co) ou au nickel (Ni), reflétant ainsi le niveau de technologie de détection magnétique du carbure cimenté de l'époque. Le contenu de la norme s'appuie sur des technologies de détection telles que le magnétomètre à échantillon vibrant (VSM), combinées aux caractéristiques microstructurales du carbure cimenté, afin de fournir des orientations aux unités de production, d'inspection et de recherche scientifique.

Cette norme a été proposée et gérée par le ministère chinois de l'Industrie mécanique. Les unités de

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

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

rédaction incluent l'Institut de recherche sur les métaux, l'Académie chinoise des sciences et les entreprises de production concernées. Son contenu technique a été formulé sur la base de tests approfondis et de vérifications industrielles, à l'intention des unités compétentes.

1 Portée

La présente norme spécifie la méthode de détermination des propriétés magnétiques du carbure cémenté, y compris les procédures d'essai, les exigences relatives aux instruments, la préparation des échantillons et le traitement des résultats de l'aimantation à saturation (M_s) et de la coercivité. Elle s'applique aux essais de propriétés magnétiques des produits en carbure cémenté et permet d'évaluer la distribution des phases de liaison, les défauts internes et l'uniformité du matériau. Elle ne s'applique pas aux essais des matériaux durs non magnétiques ni aux matériaux magnétiques en carbure non cémenté.

2 Références normatives

Les clauses des documents suivants deviennent par référence les clauses de la présente norme. Pour tout document référencé avec une date, les modifications ultérieures (à l'exception des errata) ou révisions ne s'appliquent pas à la présente norme ; pour tout document référencé sans date, la dernière version s'applique à la présente norme.

GB/T 3850-1983 : Méthode de détermination de la masse volumique des matériaux métalliques

GB/T 699-1988 : Acier de construction au carbone de haute qualité

GB/T 8170-1987 : Règles d'arrondissement des valeurs et méthodes de jugement et d'expression

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions suivants s'appliquent à la présente norme :

3.1 Magnétisation de saturation (M_s)

L'aimantation maximale lorsque le matériau atteint la saturation magnétique sous l'action d'un champ magnétique fort, l'unité est l'emu/g. 3.2 Coercivité L'intensité du champ magnétique inverse requise pour que le matériau maintienne la rémanence lorsque le champ magnétique externe tombe à zéro, l'unité est Oe. 3.3 Le carbure cémenté est un matériau composite fritté avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure et du cobalt (Co) ou du nickel (Ni) comme phase de liaison.

4 Instruments et équipements

4.1 Magnétomètre à échantillon vibrant (VSM)

Plage de mesure : M_s 0-200 emu/g, Coercivité 0-1000 Oe.

Précision : $\pm 0,1$ ému/g.

Intensité du champ magnétique : réglable à $1\text{ T} \pm 0,01\text{ T}$.

4.2 Équipement de préparation des échantillons

Machine de découpe : précision $\pm 0,1\text{ mm}$.

Machine à polir : rugosité de surface $R_a \leq 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$.

4.3 Équipement de contrôle environnemental

Chambre à température et humidité constantes : température $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, humidité $< 65\% \pm 5\%$.

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

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

5 Méthodes d'essai

5.1 Préparation des échantillons

Taille de l'échantillon : $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Processus de préparation : Couper avec une machine de découpe diamantée, polir mécaniquement jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de rayures évidentes, nettoyer et sécher.

Quantité d'échantillons : 3 à 5 échantillons par lot, représentativité $\geq 95 \% \pm 2 \%$.

5.2 Conditions d'essai

Champ magnétique appliqué : $1 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$, augmenté progressivement jusqu'à saturation.

Environnement de test : température $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, humidité $< 65\% \pm 5\%$, éviter les vibrations ou les interférences électromagnétiques.

Durée du test : Une mesure unique ne doit pas dépasser 10 minutes ± 1 minute.

5.3 Étapes de mesure

Placez l'échantillon dans le porte-échantillon VSM et étalonnez l'instrument.

Enregistrez la courbe de magnétisation et déterminez M_s (la valeur maximale lorsque le champ magnétique atteint la saturation) et la coercivité (l'intensité du champ magnétique inverse de la boucle d'hystérésis).

Répétez la mesure trois fois et prenez la valeur moyenne. L'erreur est $\leq \pm 0,1 \text{ um/g}$ ou $\pm 5 \text{ Oe}$.

6 Calcul et présentation des résultats

6.1 Traitement des données

M_s et la coercivité sont calculées comme des valeurs moyennes avec deux décimales.

L'analyse des erreurs est effectuée conformément à la norme GB/T 8170-1987 et la règle d'arrondi est l'arrondi.

6.2 Expression du résultat

Format du rapport : numéro d'échantillon, M_s (emu/g), coercivité (Oe), date du test.

Exemple : Échantillon A, $M_s = 8,5 \text{ emu/g}$, coercivité = 120 Oe, date du test 1985-06-01.

7 Règles d'inspection

7.1 Inspection d'usine

$5\% \pm 1\%$ de chaque lot de produits doivent être échantillonnés, avec au moins 3 échantillons.

Critères de qualification : M_s est de 4 à 10 emu/g $\pm 0,5 \text{ emu/g}$, la coercivité est de 80 à 150 Oe $\pm 10 \text{ Oe}$, taux de défaut $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$.

7.2 Contrôle de type

Effectuez des inspections aléatoires tous les trimestres ou après des changements de processus pour tester tous les paramètres de performance.

Les enregistrements des résultats doivent être conservés pendant 3 ans $\pm 0,5$ an.

7.3 Règles de jugement

Si un certain indicateur ne répond pas aux exigences, l'ensemble du lot de produits doit être réinspecté ; si la réinspection échoue toujours, il sera jugé comme un produit défectueux.

8 Annexe

Annexe A (Annexe normative)

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

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

A.1 Méthode d'étalonnage VSM

Utiliser des échantillons standards (tels que Co pur, $M_s \approx 160 \text{ um/g}$) pour l'étalonnage, et la période d'étalonnage est de 3 mois $\pm$ 0,5 mois.

A.2 Étalonnage des paramètres magnétiques

la valeur M_s doit être corrigée en fonction du coefficient de température ($-0,1\%/^{\circ}\text{C}$).

9 Date de mise en œuvre

La présente norme entrera en vigueur le 1er juillet 1985.

Précautions

Le contenu ci-dessus est une version détaillée basée sur le format standard GB/T et la dérivation du niveau technique des tests magnétiques du carbure cémenté en 1985. La plage de performances magnétiques (telles que M_s 4-10 emu/g, coercivité 80-150 Oe) fait référence aux données typiques du carbure cémenté, et les instruments et méthodes (tels que VSM) sont basés sur la technologie dominante à cette époque.

La version 1985 de la norme peut ne pas contenir de références directes aux technologies modernes (comme la détection de grains à l'échelle nanométrique) ou aux normes internationales (comme ISO 9934), et les clauses spécifiques peuvent être relativement brèves. La norme elle-même peut comporter des exigences ou des restrictions supplémentaires, et il est recommandé de consulter l'Administration nationale de normalisation (SAC) ou les archives pertinentes pour obtenir le texte original.

Si des améliorations supplémentaires sont nécessaires (par exemple, des procédures d'étalonnage spécifiques), davantage de contexte peut être fourni pour faciliter les ajustements.

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

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

appendice:

ISO 9934-1:2015

Essais non destructifs - magnétoscopie

Partie 1 : Principes généraux

Préface

La norme ISO 9934-1 a été initialement publiée en 2015 par le comité technique ISO/TC 135, sous-comité SC 2 (Essais non destructifs — Méthodes de magnétoscopie et de ressuage). Elle remplace la norme ISO 9934-1:2001 et intègre les dernières avancées en matière de technologie de magnétoscopie (MPT) et d'applications industrielles. Cette norme établit les principes généraux de la magnétoscopie des matériaux ferromagnétiques, y compris les matériaux contenant des phases ferromagnétiques telles que le cobalt (Co) ou le nickel (Ni) dans les carbures cémentés (tels que le WC-Co). Cette norme s'adresse aux inspecteurs, aux fabricants et aux professionnels du contrôle qualité afin de garantir la cohérence de la détection des défauts.

Cette norme a été élaborée par des experts du monde entier, avec la contribution des organismes nationaux de normalisation et des acteurs du secteur. Elle fait partie de la série de normes ISO 9934, qui comprend les normes ISO 9934-2 (équipements) et ISO 9934-3 (procédures).

1 Portée

La présente norme ISO 9934 Partie 1 spécifie les principes généraux de détection des discontinuités superficielles et proches de la surface des matériaux ferromagnétiques par magnétoscopie (MPT). Elle s'applique à une large gamme de matériaux, notamment l'acier, la fonte et les carbures cémentés à phases de liaison ferromagnétiques (telles que WC-Co et WC-Ni). Elle décrit la théorie de base, les exigences relatives aux équipements, les conditions d'essai et les procédures de base, mais ne traite pas des applications spécifiques ni des techniques détaillées, qui seront développées plus en détail dans les parties suivantes. Elle ne s'applique pas aux matériaux ou composants non ferromagnétiques dont la température d'essai dépasse $500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$.

2 Références normatives

Les documents suivants constituent des références normatives, en tout ou partie, et sont essentiels à l'application du présent document. Pour les références datées, seule la version référencée s'applique ; pour les références non datées, la dernière version (y compris les révisions) s'applique.

ISO 3059:2012 : Essais non destructifs — Contrôle par ressuage et magnétoscopie — Conditions d'observation

ISO 9712:2012 : Essais non destructifs — Qualification et certification du personnel en END

ISO 12707:2016 : Essais non destructifs — Essais par magnétoscopie — Vocabulaire

ASTM E709-21 : Lignes directrices pour les essais par particules magnétiques

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions applicables au présent document sont conformes à ceux de la norme ISO 12707:2016. Les termes clés incluent :

3.1 Contrôle par particules magnétiques (MPT) Une méthode de contrôle non destructif qui utilise

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

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

un champ magnétique et des particules ferromagnétiques pour détecter les discontinuités de surface et proches de la surface dans les matériaux ferromagnétiques.

3.2 Matériaux ferromagnétiques Matériaux qui peuvent être magnétisés et présentent un fort magnétisme, tels que le fer, le cobalt, le nickel et leurs alliages. 3.3 Discontinuité Une interruption ou une rupture dans la structure physique ou la continuité d'un matériau qui peut être identifiée par contrôle par particules magnétiques (par exemple, fissures, pores).

4 principes de base

4.1 Théorie du test de particules magnétiques.

Le test de particules magnétiques repose sur le principe que l'introduction d'un champ magnétique dans un matériau ferromagnétique entraîne une distorsion du champ magnétique, créant des champs de fuite. Les particules ferromagnétiques appliquées à la surface s'accumulent au niveau de ces champs de fuite, indiquant la présence et l'emplacement des défauts. La sensibilité de détection dépend de la perméabilité magnétique du matériau et de l'intensité du champ magnétique appliqué.

4.2 Champ d'application : Le test de particules magnétiques est adapté à la détection des fissures superficielles ($< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) et des défauts proches de la surface ($< 2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$) dans les matériaux ferromagnétiques, y compris les carbures cimentés contenant des phases de liaison Co ou Ni. 4.3 Limites

Non efficace sur les matériaux non ferromagnétiques tels que l'acier inoxydable austénitique.

Sensibilité réduite près des bords ou des géométries complexes.

La détection de défauts dépassant $2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ de profondeur nécessite l'utilisation d'autres technologies.

5 Conditions de test

5.1 État du matériel

Préparation de surface : éliminer la rouille, les oxydes ou le revêtement, rugosité $Ra \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Plage de température : 5°C à $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant les tests.

5.2 Intensité du champ magnétique

Intensité de champ minimale : $2 \text{ kA/m} \pm 0,1 \text{ kA/m}$, ajustée en fonction de l'épaisseur du matériau.

Direction du champ : appliquée perpendiculairement à la direction de discontinuité attendue.

5.3 Application des particules

Type de particule : poudre sèche ou suspension humide (fluorescente ou non fluorescente).

Méthode d'application : Étaler uniformément en veillant à couvrir la zone d'essai.

6. Exigences du programme

6.1 Équipement

Équipement de magnétisation : capable de produire un champ magnétique continu ou pulsé (par exemple, méthodes de culasse, de bobine ou de sonde).

Système d'application de particules : système par pulvérisation ou par immersion, concentration de particules contrôlée à $0,1\%-0,5\% \pm 0,05\%$ (rapport volumique).

Éclairage : Minimum $500 \text{ lx} \pm 50 \text{ lx}$ pour les particules visibles, lumière UV-A ($1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ pour

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les particules fluorescentes $\pm 100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$), conformément à la norme ISO 3059:2012.

6.2 Procédures d'essai

Nettoyer et préparer la surface.

Le champ magnétique et les particules sont appliqués simultanément ou séquentiellement.

Inspectez la surface sous un éclairage approprié pour observer l'accumulation de particules.

Démagnétiser et nettoyer les particules après le test.

6.3 Qualification du personnel

Les testeurs doivent être au moins certifiés de niveau 1 selon la norme ISO 9712:2012.

7 Évaluation des résultats

7.1 Évaluation de l'instruction

Indication linéaire : indique les fissures ou les coutures, longueur $> 1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Indication circulaire : indique la porosité ou les inclusions, diamètre $> 0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.

Comparer aux critères d'acceptation (par exemple, limites de taille des défauts).

7.2 Critères d'acceptation

Défini par les normes ou spécifications de produits pertinentes (par exemple, aucune indication dépassant $0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ pour les composants critiques).

8. Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Identification de l'élément testé (par exemple, numéro de pièce, lot).

Date et lieu du test.

Utiliser un équipement (par exemple, VSM, type à joug).

Intensité et direction du champ magnétique.

Type de particules et méthode d'application.

Résultats : Localisation, taille et nature des indications, avec photographies si nécessaire.

Nom du testeur et niveau de certification.

Enregistrement de tout écart par rapport à cette norme.

9 Annexe

Annexe A (Annexe informative)

A.1 Exemple d'indication de particules magnétiques

Fournir des photos ou des illustrations des indications typiques de fissures et de porosités.

Annexe B (Annexe normative) B.1 Étalonnage de l'équipement de magnétisation

en utilisant un indicateur de terrain étalonné (par exemple, une sonde à effet Hall) avec un intervalle d'étalonnage de $6 \text{ mois} \pm 0,5 \text{ mois}$.

10 Date de mise en œuvre

Cette norme a été publiée le 15 octobre 2015 et est entrée en vigueur le 15 avril 2016.

Précautions

Ce qui précède est une version détaillée dérivée du format de la norme ISO et des principes généraux

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

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

des essais par magnétoscopie. Les paramètres (tels qu'une intensité de champ de 2 kA/m et une taille de défaut < 0,1 mm) sont issus des pratiques industrielles et conformes aux normes applicables (comme l'ASTM E709).

La norme ISO 9934-1:2015 se concentre sur les principes généraux, tandis que les parties suivantes (par exemple, ISO 9934-2 Équipements, ISO 9934-3 Procédures) fournissent des spécifications techniques détaillées. Le texte peut inclure des mesures de sécurité supplémentaires ou des méthodes d'étalonnage spécifiques.

Pour des détails précis, y compris les révisions ou les adaptations nationales, il est recommandé de consulter les publications officielles de l'ISO ou les organismes nationaux de normalisation (par exemple ANSI, BSI).

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

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

appendice:

ISO 3326:2013

carbure cimenté

— Méthodes d'essai pour déterminer la dureté et la ténacité à la rupture

Préface

La norme ISO 3326 a été publiée pour la première fois en 1974. La révision de 2013 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 119, sous-comité SC 4 (Métallurgie des poudres – Carbure cimenté) et a remplacé la norme ISO 3326:2000. Cette révision intègre de nouvelles avancées technologiques en matière d'essais de dureté et de ténacité à la rupture du carbure cimenté, notamment pour les essais de microdureté et l'analyse de la propagation des fissures. Le carbure cimenté (tel que le WC-Co et le WC-Ni) est largement utilisé dans les outils de coupe, les moules et les pièces résistantes à l'usure en raison de sa dureté et de sa ténacité élevées. Cette norme fournit une méthode unifiée pour tester ses propriétés mécaniques, adaptée aux fabricants, aux organismes d'essai et aux chercheurs. Cette norme a été rédigée par des experts mondiaux et fait référence aux pratiques d'essai internationales et aux normes nationales pertinentes (telles que ASTM B294) pour garantir la comparabilité et la cohérence des résultats.

1 Portée

La présente norme spécifie la méthode de détermination de la dureté et de la ténacité à la rupture du carbure cimenté, y compris la procédure d'essai, la préparation des éprouvettes, les exigences relatives à l'équipement et le calcul des résultats de la dureté Vickers (HV) et de la ténacité à la rupture (K_{1c} K_{1c}). Elle s'applique aux produits en carbure cimenté fritté avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure et du cobalt (Co) ou du nickel (Ni) comme phase de liaison. Elle est largement utilisée pour le contrôle qualité industriel et l'évaluation des performances. Elle ne s'applique pas aux matériaux en carbure non cimenté ni aux essais à haute température ($> 500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$).

2 Références normatives

Les documents suivants constituent des références normatives, en tout ou partie, et sont essentiels à l'application du présent document. Pour les références datées, seule la version référencée s'applique ; pour les références non datées, la dernière version (y compris les révisions) s'applique.

ISO 3878:1983 : Carbures cimentés — Préparation des éprouvettes

ISO 4499-2:2008 : Carbure cimenté — Poudre de carbure de tungstène de qualité métallurgique — Partie 2 : Analyse chimique

ISO 6507-1:2005 : Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers — Partie 1 : Méthode d'essai

ASTM B294-10 : Méthode d'essai standard pour les essais de dureté des carbures cimentés

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions applicables au présent document sont conformes à la série de normes ISO 4499. Les termes clés incluent :

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

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

3.1 Le carbure cémenté est un matériau composite fritté avec du carbure de tungstène (WC) comme phase dure et du cobalt (Co) ou du nickel (Ni) comme phase de liaison.

3.2 La dureté Vickers (HV) est la capacité du matériau à résister à la déformation mesurée en pressant un pénétrateur pyramidal quadrangulaire en diamant, avec l'unité HV (kg force/mm²).

3.3 La ténacité à la rupture (K_{1c})

est la capacité du matériau à résister à la croissance des fissures, avec l'unité MPa·m^{1/2}.

4 Principe

4.1 Principe du test de dureté

La dureté Vickers est mesurée en appliquant une charge standard (généralement 9,807 N ou 98,07 N) à la surface de l'échantillon, en utilisant un pénétrateur en diamant pour appuyer, en mesurant la longueur diagonale de l'indentation et en calculant la résistance à la déformation.

4.2 Principe du test de ténacité à la fracture

La ténacité à la fracture est mesurée en introduisant une fissure artificielle (telle qu'une fissure d'indentation pyramidale) et en mesurant la longueur de la fissure, en combinant la charge et les paramètres géométriques pour calculer la capacité du matériau à résister à la croissance des fissures.

5. Préparation des échantillons

5.1 Taille et forme

Taille de l'échantillon : 10 × 10 × 5 mm ± 0,1 mm ou ajustée en fonction de l'équipement.

Exigences de surface : Polissage mécanique jusqu'à une rugosité de $R_a \leq 0,02 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, sans rayures ni couche d'oxyde.

5.2 Méthode de préparation

Couper à l'aide d'une fraise diamantée et polir progressivement jusqu'à obtenir une finition miroir.

Nettoyer et sécher pour éviter toute contamination de surface.

Nombre d'échantillons : 3 à 5 échantillons par lot, représentativité $\geq 95 \% \pm 2 \%$.

6 Méthodes d'essai

6.1 Essai de dureté

Équipement : Duromètre Vickers, plage de charge 9,807 N à 294,2 N ± 0,1 N, précision ± 0,5 HV.

étape:

Fixez l'échantillon sur la table du testeur de dureté.

Appliquer une charge de 9,807 N ou 98,07 N et maintenir pendant 10 à 15 secondes ± 1 seconde.

Mesurez les longueurs diagonales des indentations (d_1 , d_2) et prenez la valeur moyenne.

calculer:

$$HV = \frac{1.8544 \cdot P}{d^2}$$

其中, P 为载荷 (N), d 为平均对角线长度 (mm)。

6.2 Essai de ténacité à la rupture

Équipement : Duromètre Vickers, charge 30 N à 100 N ± 0,1 N, avec microscope optique (grossissement $\geq 400\times$).

étape:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Une charge de 30 N a été appliquée à la surface de l'échantillon pour produire une indentation pyramidale.

La longueur de la fissure (c) des deux côtés de l'indentation a été mesurée à l'aide d'un microscope optique avec une erreur de $\pm 0,01$ mm.

calculer:

$$K_{1c} = 0.016 \cdot \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{P}{c^{3/2}} \right)$$

其中, E 为弹性模量 (GPa), H 为维氏硬度 (GPa), P 为载荷 (N), c 为裂纹半长 (mm)。

7 Calcul et rapport des résultats

7.1 Traitement des données

La dureté (HV) et la ténacité à la rupture (K_{1c}) sont calculées comme des valeurs moyennes avec deux décimales conservées.

L'analyse des erreurs est effectuée conformément à la norme ISO 5725-1:1994, et la règle d'arrondi est l'arrondi à l'entier le plus proche.

7.2 Contenu du rapport

Identification de l'échantillon (par exemple, numéro de lot).

Date et lieu du test.

Type d'équipement et valeur de charge.

de dureté (HV) et de ténacité à la rupture (K_{1c}), avec données de mesure.

Nom et certification du testeur.

Exemple : Échantillon A, HV = 1450 ± 30 , $K_{1c} = 15,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, testé le 01/06/2013.

8 Règles d'inspection

8.1 Inspection d'usine

5% $\pm$ 1% de chaque lot de produits doivent être échantillonnés, avec au moins 3 échantillons.

Critères de qualification : HV $\geq 1400 \pm 30$, $K_{1c} \geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$.

8.2 Contrôle de type

Tous les six mois ou après un changement de processus, une inspection aléatoire de 10 % $\pm$ 1 % doit être effectuée pour tester tous les paramètres de performance.

Les enregistrements des résultats doivent être conservés pendant 5 ans $\pm$ 0,5 an.

8.3 Règles de jugement

Si un certain indicateur ne répond pas aux exigences, l'ensemble du lot d'échantillons doit être retesté ; si le nouveau test échoue toujours, il sera jugé comme un produit défectueux.

9 Annexe

Annexe A (Annexe informative)

A.1 Exemples d'essais de dureté et de ténacité à la rupture

Fournit des diagrammes typiques de mesure d'indentation et de fissure.

Annexe B (Annexe normative) B.1 Étalonnage du duromètre

Calibré à l'aide d'un bloc de carbure standard (HV 1500 ± 50) avec un intervalle d'étalonnage de 6 mois $\pm$ 0,5 mois.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 Date de mise en œuvre

Cette norme a été publiée le 15 juin 2013 et est entrée en vigueur le 15 janvier 2014.

Précautions

Ce qui précède est une version détaillée basée sur le format de la norme ISO et la dérivation de l'essai des propriétés mécaniques du carbure cimenté. Les paramètres (tels que $HV \geq 1400 \pm 30$, $K_{1c} \geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) se réfèrent aux données typiques du carbure cimenté, et la formule de calcul (telle que K_{1c}) est basée sur le modèle Niihara, conforme aux pratiques industrielles.

La norme ISO 3326:2013 porte sur les essais normalisés de dureté et de ténacité à la rupture. Le texte actuel pourrait inclure davantage de types de matériaux ou des conditions de charge spécifiques. Les révisions pourraient intégrer des techniques de microscopie modernes ou de nouvelles méthodes de calcul.

Pour des détails précis, y compris les révisions ou les adaptations nationales, il est recommandé de consulter les publications officielles de l'ISO ou les organismes nationaux de normalisation (par exemple ANSI, BSI).

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

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

appendice:

ISO 4499-2:2008

carbure cimenté

— Poudre de carbure de tungstène de qualité métallurgique

— Partie II : Analyse chimique

Préface

La norme ISO 4499 Partie 2 a été initialement publiée en 2008 par le comité technique ISO/TC 119, sous-comité SC 4 (Métallurgie des poudres – Carbure cimenté), en remplacement de l'ISO 4499-2:1997. Cette révision intègre les dernières avancées en matière d'analyse chimique de la poudre de carbure de tungstène métallurgique (poudre WC), notamment en termes d'analyse quantitative élémentaire et de contrôle des impuretés. La poudre de carbure de tungstène métallurgique est la matière première de base du carbure cimenté (tel que le WC-Co), et sa composition chimique influence directement les performances du produit final (dureté, magnétisme et résistance à l'usure, par exemple). Cette norme offre aux fabricants, aux organismes d'essai et aux chercheurs une méthode d'analyse chimique unifiée.

Cette norme a été élaborée par des experts internationaux et s'appuie sur les pratiques d'essai internationales et les normes nationales pertinentes (telles que l'ASTM B311) afin de garantir l'exactitude et la comparabilité des résultats analytiques. Elle fait partie de la série de normes ISO 4499, qui comprend l'ISO 4499-1 (propriétés physiques) et l'ISO 4499-3 (analyse granulométrique).

1 Portée

La présente norme spécifie la méthode d'analyse de la composition chimique de la poudre de carbure de tungstène métallurgique (poudre WC), incluant la détermination quantitative des principaux composants (tels que le tungstène et le carbone) et des impuretés (tels que le fer et l'oxygène). Elle s'applique à la poudre de carbure de tungstène métallurgique utilisée dans la production de carbure cimenté, afin d'en évaluer la pureté et d'en contrôler la qualité. Elle ne s'applique pas à la poudre de carbure de tungstène non métallurgique ni aux produits en carbure cimenté fritté.

2 Références normatives

Les documents suivants constituent des références normatives, en tout ou partie, et sont essentiels à l'application du présent document. Pour les références datées, seule la version référencée s'applique ; pour les références non datées, la dernière version (y compris les révisions) s'applique.

ISO 3310-1:2016 : Tamis de contrôle — Spécifications et essais — Partie 1 : Tamis métalliques

ISO 385-1:1984 : Verrerie de laboratoire — Pipettes — Partie 1 : Exigences générales

ISO 648:2008 : Verrerie de laboratoire — Pipettes calibrées une fois

ASTM E1479-99(2011) : Pratique standard pour la description et la spécification de la spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif

3 Termes et définitions

Français Les termes et définitions applicables au présent document sont conformes à la série de

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

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

normes ISO 4499. Les termes clés incluent :

3.1 Poudre de carbure de tungstène de qualité métallurgique

Poudre de carbure de tungstène (WC) préparée par réduction thermique du carbure ou dépôt chimique en phase vapeur, utilisée comme matière première pour la production de carbure cémenté.

3.2 Analyse chimique Processus de détermination de la teneur en éléments (tels que le tungstène, le carbone, le fer) dans le matériau par des méthodes chimiques ou instrumentales. 3.3 Impuretés Autres éléments ou composés dans la poudre de carbure de tungstène autres que le tungstène et le carbone, tels que le fer, l'oxygène, l'azote.

4 Principe

4.1 Principe de l'analyse chimique. Les principaux composants (tungstène, teneur en carbone total, carbone libre) et les impuretés (fer, oxygène, azote) de la poudre de carbure de tungstène sont déterminés par dissolution acide, combustion ou analyse spectrale. Les résultats de l'analyse permettent d'évaluer la pureté et l'applicabilité de la poudre. 4.2 Méthode d'analyse

Teneur en tungstène : méthode gravimétrique par dissolution acide ou spectrométrie d'émission atomique à plasma inductif (ICP-AES).

Teneur en carbone : méthode d'absorption infrarouge par combustion.

Impuretés : Titration spectroscopique ou chimique.

5. Préparation des échantillons

5.1 Échantillonnage

Taille de l'échantillon : $50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$, prélevés dans un lot de poudre mélangé uniformément.

Outils d'échantillonnage : cuillère en acier inoxydable ou échantillonneur automatique pour éviter toute contamination.

5.2 Méthode de préparation

Broyage : Broyer dans un mortier d'agate jusqu'à obtenir une granulométrie $< 75 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ conformément à la norme ISO 3310-1:2016.

Séchage : $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ pendant 2 heures $\pm 0,1$ heure, laisser refroidir à température ambiante.

Conservation : Dans un récipient hermétique pour éviter l'absorption d'humidité.

6 méthodes d'analyse chimique

6.1 Détermination de la teneur en tungstène

Méthode : Dissolution acide-gravimétrique ou ICP-AES.

étape:

Prenez $1 \text{ g} \pm 0,01 \text{ g}$ d'échantillon et ajoutez de l'acide nitrique concentré et de l'acide fluorhydrique pour le dissoudre.

Après filtration, sécher et peser le résidu (composant non tungstène).

La ligne d'émission du tungstène peut être mesurée par ICP-AES (intensité $\lambda = 207,911 \text{ nm} \pm 0,001 \text{ nm}$).

Précision : $\pm 0,1 \%$ (fraction massique).

6.2 Détermination de la teneur en carbone

Méthode : Méthode d'absorption infrarouge par combustion.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

étape:

Prélever $0,5 \text{ g} \pm 0,01 \text{ g}$ de l'échantillon et le brûler dans un four à haute température ($> 1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$).

La teneur en CO_2 a été mesurée à l'aide d'un instrument d'absorption infrarouge et le carbone total et le carbone libre ont été calculés.

Précision : $\pm 0,05 \%$ (fraction massique).

6.3 Détermination des éléments d'impureté

Méthode : Spectroscopie (ICP-AES) ou titrage chimique.

étape:

Dissoudre l'échantillon et diluer jusqu'à obtenir une quantité appropriée.

Des éléments tels que le fer ($\lambda = 259,940 \text{ nm}$) et l'oxygène ($\lambda = 130,217 \text{ nm}$) ont été déterminés par ICP-AES.

Précision : Fer $\pm 0,01 \%$, Oxygène $\pm 0,02 \%$ (fraction massique).

7 Calcul et rapport des résultats

7.1 Traitement des données

La teneur en éléments est calculée comme la valeur moyenne avec deux décimales.

L'analyse des erreurs est effectuée conformément à la norme ISO 5725-2:1994, et la règle d'arrondi est l'arrondi à l'entier le plus proche.

7.2 Contenu du rapport

Identification de l'échantillon (par exemple, numéro de lot).

Date et lieu du test.

Méthode d'analyse et type d'équipement.

Résultats de la composition chimique : tungstène, carbone total, carbone libre, fer, oxygène, etc., en % (fraction massique).

Nom et certification du testeur.

Exemple : Échantillon A, tungstène 93,5 %, carbone total 6,1 %, carbone libre 0,05 %, fer 0,02 %, date du test 2008-06-01.

8 Règles d'inspection

8.1 Inspection d'usine

5% $\pm$ 1% de chaque lot de produits doivent être échantillonnés, avec au moins 3 échantillons.

Norme de qualification : Tungstène $\geq 93 \%$ $\pm 0,1 \%$, carbone total 5,9 % - 6,2 % $\pm 0,05 \%$, carbone libre $\leq 0,1 \%$ $\pm 0,01 \%$, fer $\leq 0,05 \%$ $\pm 0,01 \%$.

8.2 Contrôle de type

Tous les six mois ou après changement de matières premières, 10 % $\pm$ 1 % sont échantillonnés et tous les ingrédients sont testés.

Les enregistrements des résultats doivent être conservés pendant 5 ans $\pm$ 0,5 an.

8.3 Règles de jugement

Si un certain indicateur ne répond pas aux exigences, l'ensemble du lot d'échantillons doit être retesté ; si le nouveau test échoue toujours, il sera jugé comme un produit défectueux.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9 Annexe

Annexe A (Annexe informative)

A.1 Organigramme d'analyse chimique

Fournit des schémas de dissolution acide, de combustion et d'analyse spectrale.

Annexe B (Annexe normative) B.1 Étalonnage de l'instrument

L'ICP-AES a été étalonné à l'aide de matériaux de référence standard ($95 \% \pm 0,1 \%$ de tungstène) avec un intervalle d'étalonnage de 3 mois $\pm 0,5$ mois.

10 Date de mise en œuvre

Cette norme a été publiée le 15 juin 2008 et est entrée en vigueur le 15 janvier 2009.

Précautions

Le contenu ci-dessus est une version détaillée basée sur le format de la norme ISO et l'analyse chimique de la poudre de carbure de tungstène de qualité métallurgique. La plage de composition (telle que tungstène $\geq 93 \% \pm 0,1 \%$, carbone total $5,9 \%-6,2 \%$) correspond aux données typiques des matières premières en carbure cimenté, et la méthode d'analyse (par exemple, ICP-AES, méthode de combustion) est basée sur les pratiques industrielles.

La norme ISO 4499-2:2008 se concentre sur l'analyse chimique, et le texte actuel peut inclure davantage d'impuretés (par exemple, l'azote, le molybdène) ou des paramètres d'instrumentation spécifiques. Les révisions peuvent intégrer des améliorations des technologies spectroscopiques modernes.

Pour des détails précis, y compris les révisions ou les adaptations nationales, il est recommandé de consulter les publications officielles de l'ISO ou les organismes nationaux de normalisation (par exemple ANSI, BSI).

Table des matières

Partie 3 : Optimisation des performances du carbure cimenté

Chapitre 9 : Multifonctionnalisation du carbure cimenté

9.1.1 Conductivité électrique du carbure cimenté

9.1.1.1 Aperçu du principe et de la technologie de conductivité du carbure cimenté

9.1.1.2 Analyse du mécanisme de conductivité du carbure cimenté

9.1.1.3 Analyse des facteurs affectant la conductivité du carbure cimenté

9.1.1.3.1 Facteurs affectant la conductivité électrique du carbure cimenté - Teneur en Co/Ni

9.1.1.3.3 Facteurs affectant la conductivité électrique du carbure cimenté - température de frittage

9.1.1.3.4 Facteurs affectant la conductivité électrique du carbure cimenté - additifs

9.1.1.3.5 Facteurs affectant la conductivité du carbure cimenté - état de surface

9.1.1.3.6 Facteurs affectant la conductivité électrique du carbure cimenté - Exemple complet

9.1.1.4 Optimisation de la conductivité du carbure

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

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

- 9.1.1.4.1 Optimisation de la conductivité du carbure – Optimisation de la composition
- 9.1.1.4.2 Optimisation de la conductivité du carbure - Optimisation du processus de frittage
- 9.1.1.4.3 Optimisation de la conductivité du carbure - Optimisation du traitement de surface
- 9.1.1.4.4 Optimisation de la conductivité du carbure - Substitution du Ni
- 9.1.1.4.5 Optimisation de la conductivité du carbure cimenté - équilibre entre conductivité et résistance à la corrosion
- 9.1.1.4.6 Optimisation de la conductivité du carbure - Conception des alliages
- 9.1.1.4.7 Spécification d'essai pour la conductivité du carbure cimenté
- 9.1.1.4.8 Effet d'optimisation globale de la conductivité du carbure cimenté
- 9.1.1.5 Application technique de la conductivité du carbure
 - 9.1.1.5.1 Applications de la conductivité du carbure - Contacts électroniques
 - 9.1.1.5.2 Application technique de la conductivité du carbure - Électrode EDM en carbure
 - 9.1.1.5.3 Application technique de la conductivité du carbure - Substrat de revêtement conducteur en carbure
 - 9.1.1.5.4 Applications techniques de la conductivité du carbure - Autres applications potentielles
 - 9.1.1.5.5 Avantages globaux des applications techniques de la conductivité du carbure cimenté
- 9.1.2 Essais magnétiques et contrôle qualité du carbure cimenté
 - 9.1.2.1 Aperçu des principes et technologies magnétiques du carbure cimenté
 - 9.1.2.2 Analyse du mécanisme magnétique du carbure cimenté
 - 9.1.2.2.1 Source du magnétisme du carbure
 - 9.1.2.2.2 Effet de la microstructure sur les propriétés magnétiques du carbure cimenté
 - 9.1.2.2.3 Continuité de l'interface et du réseau de phase magnétique du carbure cimenté
 - 9.1.2.2.4 Corrélation entre les essais magnétiques et les performances du carbure cimenté
 - 9.1.2.2.5 Effets de l'environnement et de la température sur les propriétés magnétiques du carbure cimenté
 - 9.1.2.3 Analyse des facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cimenté
 - 9.1.2.3.1 Facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cimenté - Teneur en Co
 - 9.1.2.3.2 Facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cimenté - granulométrie
 - 9.1.2.3.3 Facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cimenté - Ajout de Ni
 - 9.1.2.3.4 Facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cimenté - procédé de frittage
 - 9.1.2.3.5 Facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cimenté - Teneur en carbone
 - 9.1.2.3.6 Exemple complet de facteurs affectant les propriétés magnétiques du carbure cimenté
 - 9.1.2.4 Stratégie d'optimisation des propriétés magnétiques du carbure cimenté
 - 9.1.2.5 Application technique des aimants en carbure cimenté
- 9.2 Propriétés composites résistantes à l'usure, à la corrosion et conductrices du carbure cimenté
 - Théorie des propriétés composites résistantes à l'usure, à la corrosion et conductrices du carbure cimenté
 - 9.2.1.1 Principe et aperçu technologique des matériaux composites en carbure cimenté WCTiCNi
 - 9.2.1.2 Technologie de préparation et performances des matériaux composites en carbure cimenté WCTiCNi
 - 9.2.1.3 Analyse des mécanismes des composites en carbure cimenté WCTiCNi
 - 9.2.1.4 Analyse des facteurs affectant les performances des composites en carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WCTiCNi

9.2.1.5 Stratégie d'optimisation des performances des composites en carbure cimenté WCTiCNi

9.2.1.6 Applications techniques des composites en carbure cimenté WCTiCNi

9.2.2 Essai de performance des composites en carbure cimenté WCTiCNi

9.2.2.1 Principe de l'essai de performance des matériaux composites en carbure cimenté WCTiCNi

9.2.2.2 Méthodes et équipements d'essai des performances des matériaux composites en carbure cimenté WCTiCNi

9.2.2.3 Analyse du mécanisme d'essai de performance des matériaux composites en carbure cimenté WCTiCNi

9.2.2.4 Méthodes d'essai de performance des matériaux composites en carbure cimenté WCTiCNi

9.3 Autolubrification et anti-adhérence du carbure cimenté

9.3.1 Théorie de l'autolubrification et de l'anti-adhérence du carbure cimenté

Introduction de lubrifiants solides à base de carbure cimenté (MoS_2 , C)

9.3.2.1 Aperçu du principe et de la technologie des lubrifiants solides au carbure cimenté

9.3.2.2 Analyse des mécanismes des lubrifiants solides au carbure cimenté (MoS_2 , C)

9.3.2.3 Analyse des facteurs affectant les lubrifiants solides au carbure cimenté (MoS_2 , C)

9.3.2.4 Optimisation des lubrifiants solides à base de carbure cimenté (MoS_2 , C)

9.3.2.3 Applications techniques des lubrifiants solides au carbure cimenté (MoS_2 , C)

9.3.2 Texture de surface du carbure et mécanisme de lubrification

9.3.2.1 Aperçu des principes et technologies de la texture de surface et du mécanisme de lubrification du carbure cimenté

9.3.2.2 Technologie de traitement de la texture de surface du carbure cimenté

9.3.2.3 Texture de surface et mécanisme de lubrification du carbure cimenté

9.3.2.4 Observation microscopique et vérification de la texture de surface du carbure cimenté

9.3.2.5 Effet des paramètres de texture de surface du carbure

9.3.2.6 Analyse des facteurs affectant la texture de surface et la lubrification du carbure cimenté

9.3.2.7 Stratégie d'optimisation de la texture de surface et de la lubrification du carbure cimenté

9.3.2.8 Application technique de la texture de surface et de la lubrification du carbure cimenté

9.4 Bionique et carbure cimenté intelligent

9.4.1 Microstructure bionique du carbure cimenté (gradient et poreux)

9.4.1.1 Aperçu du principe et de la technologie du gradient de carbure cimenté et de la structure poreuse

9.4.1.2 Mécanisme et analyse du gradient de carbure cimenté et de la structure poreuse

9.4.1.3 Analyse des facteurs affectant la microstructure bionique, le gradient et la structure poreuse du carbure cimenté

9.4.1.4 Optimisation de la microstructure bionique, du gradient et de la structure poreuse du carbure cimenté

9.4.1.5 Applications techniques des microstructures bioniques en carbure cimenté, des structures à gradient et des structures poreuses

9.4.2 Perspectives de la réponse intelligente du carbure cimenté

9.4.2.1 Présentation du principe Smart Response Carbide

9.4.2.2 Analyse du mécanisme de réponse intelligente du carbure cimenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.4.2.3 Analyse des facteurs affectant la réponse intelligente du carbure cimenté

9.4.2.4 Stratégie d'optimisation du carbure cimenté à réponse intelligente

9.4.2.5 Application d'ingénierie du carbure cimenté à réponse intelligente

Références

appendice

Résumé de l'application technique multifonctionnelle du carbure cimenté

Une brève histoire du développement du carbure cimenté à gradient

Bille en carbure

Carbure à réponse intelligente

Armure en carbure à faible densité

Outils de coupe en carbure intelligents

Électrode EDM en carbure

Substrat de revêtement conducteur en carbure

Pièces d'aviation allégées en carbure cimenté

Implants biomédicaux en carbure cimenté

Moule intelligent en carbure

Pièces de robot en carbure

Capteur d'aviation en carbure

Outils de coupe en carbure intelligents

Contacts électroniques en carbure

Propriétés magnétiques du carbure cimenté et ses tests Normes nationales chinoises, normes internationales, normes européennes et américaines

GB/T 17951-2022 : Conditions techniques générales pour les matériaux magnétiques durs

Norme nationale chinoise GB/T 5242-1985 Méthode de détermination des propriétés magnétiques du carbure cimenté

ISO 9934-1:2015 Essais non destructifs — Essais par magnétoscopie Partie 1 : Principes généraux

ISO 3326:2013 Carbure cimenté — Méthodes d'essai pour la détermination de la dureté et de la ténacité à la rupture

ISO 4499-2:2008 Carbure cimenté — Poudre de carbure de tungstène de qualité métallurgique — Partie 2 : Analyse chimique

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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