

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

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 de 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 de 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

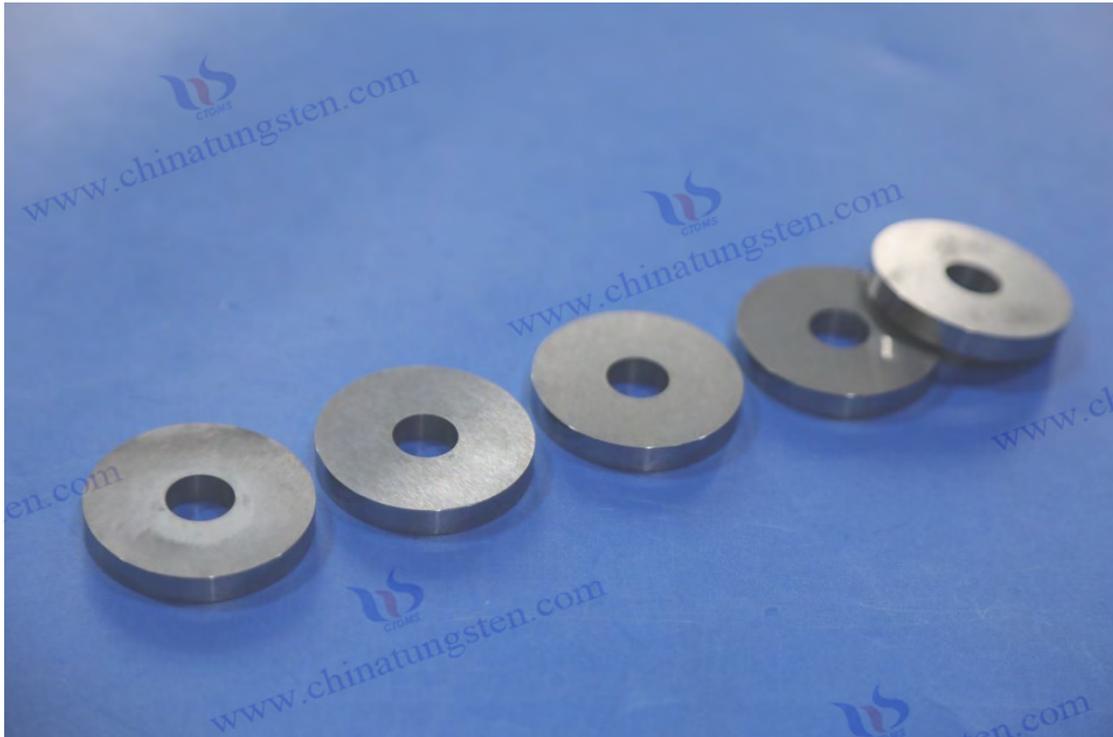
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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 2 : Procédé de préparation du carbure cimenté

Chapitre 6 : Technologie des revêtements et des composites

L'alliage dur (WCCo) joue un rôle important dans les domaines de l'aérospatiale, de l'exploitation minière, de l'énergie et de l'ingénierie sous-marine en raison de son excellente dureté (HV1500-2500±30), de sa bonne ténacité (K_{Ic} 8-20 MPa·m^{1/2} ± 0,5) et de son excellente résistance à la compression (>4000 MPa±100 MPa). Cependant, dans des conditions de travail extrêmes, une température élevée (>1000°C±10°C), une forte corrosion (pH<4±0,1) et un impact élevé (>10³Hz ± 100 Hz) imposent des exigences plus élevées en matière de performances de surface, et un seul alliage dur est difficile à satisfaire pleinement aux exigences.

Français La technologie des revêtements et des composites améliore considérablement la résistance à l'usure (taux d'usure < 0,06 mm³/ N·m ± 0,01 mm³/ N·m), la résistance à la corrosion (taux de corrosion < 0,01 mm/an ± 0,002 mm/ an) et la résistance à la fatigue thermique (durée de vie > 10⁵ fois ± 10⁴ fois) grâce à la modification de surface (épaisseur du revêtement 10-200 μm ± 1 μm) et à l'optimisation structurelle (couche de gradient, nano WC < 100 nm ± 5 nm) . Ces technologies prolongent non seulement la durée de vie du carbure cimenté, mais élargissent également son domaine d'application, comme les aubes de turbines d'aviation (durée de vie > 5 000 heures ± 500 heures), les trépan de forage minier (> 1 500 m ± 100 m) et les vannes en haute mer (> 5 ans ± 0,5 an).

Ce chapitre aborde les processus clés et les principes techniques sous quatre aspects : **la préparation du revêtement en carbure cimenté , Matériaux de revêtement, carbure cimenté à gradient et**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nanostructuré et tests de performance de revêtement . La préparation du revêtement se concentre sur la technologie de projection thermique (telle que HVOF, APS, projection par détonation) et permet d'obtenir un revêtement de dureté élevée (HV 1200-1500±30) en optimisant les paramètres de projection (vitesse 600-4000 m/s±10 m/s, température 2000-15000 °C±100°C) ; l'optimisation des matériaux couvre les revêtements WCCo , WCNiCr et multiphasés (tels que WCTiCNi), en équilibrant la dureté et la ténacité (K_{Ic} 10-15 MPa·m^{1/2} ± 0,5) ; le gradient et la nanostructure améliorent les performances globales (résistance > 4500 MPa±100 MPa) grâce à l'ingénierie des interfaces et au renforcement des nanocristaux ; les tests de performance vérifient la fiabilité du revêtement selon les normes (telles que ASTM G65, ISO 6508). Chaque section combine les détails du processus, les mécanismes scientifiques, les stratégies d'optimisation et les pratiques d'ingénierie pour révéler la valeur fondamentale de la technologie des revêtements et des composites.

Par exemple, le revêtement WC12Co par pulvérisation HVOF (vitesse 700 m/s±10 m/s, épaisseur 100 µm±1 µm) permet aux aubes de turbine d'aviation de maintenir une faible usure (< 0,05 mm³/N·m±0,01 mm³/ N·m) dans un flux d'air à haute température (1 000 °C±10 °C), avec une durée de vie de plus de 5 000 heures ± 500 heures ; le gradient WCCo (teneur en Co 5 %-15 %±1 %) améliore la résistance aux chocs des forêts minières, avec une profondeur de forage de 1 800 m±100 m ; le revêtement nano WC (grain < 100 nm±5 nm) est utilisé pour les vannes en haute mer, avec une résistance à la corrosion de plus de 5 ans ± 0,5 an. Ce chapitre se connecte de manière transparente au chapitre 5 (moulage et frittage, taille des particules de WC 0,1-10 µm ± 0,01 µm, densité > 99,5 % ± 0,1 %) via des paramètres de processus et des données de performance, jetant les bases des chapitres suivants (application et optimisation).

6.1 Préparation du revêtement en carbure cémenté

Les revêtements en carbure cémenté sont préparés par projection thermique, dépôt physico-chimique en phase vapeur (PVD/CVD) ou placage laser pour déposer des revêtements fonctionnels (épaisseur 10-200 µm ± 1 µm, dureté HV 1200-1500 ± 30) sur des substrats hautes performances (dureté HV 1500-2500 ± 30, rugosité de surface Ra < 0,05 µm ± 0,01 µm). Ces revêtements améliorent significativement la résistance à l'usure (taux d'usure < 0,06 mm³ / N · m ± 0,01 mm³ / N · m) , la résistance à la corrosion (taux de corrosion < 0,01 mm/an ± 0,002 mm/an) et la résistance à l'oxydation à haute température (gain de poids par oxydation < 0,1 mg/cm² ± 0,02 mg/cm²) , répondant aux exigences des conditions de travail exigeantes. La technologie de projection thermique est le choix privilégié en raison de sa grande efficacité (taux de dépôt > 90 % ± 2 %), de sa flexibilité (taille du substrat applicable > 100 mm ± 1 mm) et de son économie (coût < 500 \$/m² ± 50 \$), et est largement utilisée dans les domaines de l'aviation, des mines et de l'énergie.

Cette section détaille les trois principales technologies : la projection d'oxygène combustible à haute vitesse (HVOF), la projection plasma (APS) et la projection par détonation, et analyse leurs principes de procédé, l'optimisation des paramètres et les scénarios d'application. La qualité du revêtement dépend des paramètres de projection (vitesse, température, distance de projection), des caractéristiques de la poudre (granulométrie : 10-50 µm ± 1 µm, fluidité : 12-15 secondes/50 g ±

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,5 seconde) et du prétraitement du substrat (rugosité : $Ra : 2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). Grâce à la mécanique des fluides thermiques (vitesse du jet : $600-4\ 000 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$) et au mécanisme de liaison des interfaces (force de liaison : $50-80 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$), cette section révèle la technologie de base.

Français Par exemple, le revêtement WC12Co pulvérisé HVOF (porosité $< 1 \% \pm 0,2 \%$) est utilisé pour les aubes de turbine d'aviation, avec une durée de vie de plus de $5\ 000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$; le revêtement WCNiCr pulvérisé APS (épaisseur $150 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) augmente la durée de vie des trépan miniers à $1\ 500 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$. Ce qui suit est un guide complet pour la préparation de revêtements hautes performances du point de vue des détails du processus, des facteurs d'influence et des pratiques d'ingénierie.

6.1.1 Pulvérisation de combustible à l'oxygène à grande vitesse (HVOF, dureté du revêtement HV 1200-1500)

Aperçu du principe du processus et de la technologie

La projection d'oxygène combustible à haute vitesse (HVOF) est une technologie de projection thermique hautement efficace. Grâce à la combustion d'oxygène et de combustible, un jet à haute température et à grande vitesse est généré pour déposer des matériaux en poudre sur le substrat en carbure cémenté et former un revêtement très dur et résistant à l'usure. Le cœur de la HVOF est le jet supersonique (vitesse $600-800 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$), qui fond partiellement les particules de poudre (WCCo, granulométrie $10-45 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) et impacte le substrat à grande vitesse pour former un revêtement dense (porosité $< 1 \% \pm 0,2 \%$).

Français Par rapport à la pulvérisation traditionnelle, le HVOF a une température plus basse ($2000-3000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), évitant efficacement la décomposition du WC ($< 0,5\% \pm 0,1\%$), et convient à la préparation de revêtements en carbure cémenté haute performance. L'équipement HVOF comprend un pistolet de pulvérisation (puissance $> 100 \text{ kW} \pm 10 \text{ kW}$), une chambre de combustion (pression $5-10 \text{ bar} \pm 0,5 \text{ bar}$) et une buse Laval (diamètre du col $8-12 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$). L'oxygène (pureté $> 99,5\% \pm 0,1\%$, débit $800-1200 \text{ L/min} \pm 10 \text{ L/min}$) réagit avec le carburant (tel que le kérosène, débit $0,3-0,5 \text{ L/min} \pm 0,01 \text{ L/min}$) dans la chambre de combustion, libérant une enthalpie élevée ($> 10 \text{ MJ/kg} \pm 0,5 \text{ MJ/kg}$).

Le jet est accéléré à une vitesse supersonique par la buse Laval, propulsant la poudre contre le substrat (rugosité $Ra 2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), formant des particules plates (diamètre $50-100 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$), assurant une résistance à l'adhérence de $50-80 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$. Ce procédé permet d'obtenir une dureté du revêtement HV de $1200-1500 \pm 30$, largement utilisée dans l'aéronautique, l'exploitation minière et d'autres secteurs.

Paramètres du processus et mécanisme de dépôt

La formation du revêtement HVOF implique quatre étapes : la combustion, l'accélération des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

particules, la fusion et le dépôt :

Étape de combustion

L'oxygène réagit avec le carburant pour générer un jet à haute température ($3\,000\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$). Cette température est inférieure au point de décomposition du WC ($\sim 3\,500\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$), ce qui réduit les pertes de carbure ($< 0,5\% \pm 0,1\%$). L'enthalpie thermique ($> 10\text{ MJ/kg} \pm 0,5\text{ MJ/kg}$) assure un chauffage complet des particules.

Accélération des particules

La poudre est accélérée dans le jet (vitesse $700\text{ m/s} \pm 10\text{ m/s}$, temps de séjour $< 1\text{ ms} \pm 0,1\text{ ms}$), la surface fond (taux de fusion $70\%-90\% \pm 2\%$), le noyau reste solide ($< 50\% \pm 5\%$ fondu) et les grains de WC ($0,5\text{-}2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) sont retenus.

Fusion et impact des particules

Les particules semi-fondues impactent le substrat pour former des projections plates, et l'enclenchement mécanique et la diffusion de traces (profondeur $< 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) forment une force de liaison élevée ($> 60\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$).

Solidification du revêtement

Un refroidissement rapide (vitesse $> 10^6\text{ K/s} \pm 10^5\text{ K/s}$) produit un revêtement dense (porosité $< 1\% \pm 0,2\%$) avec une dureté de $\text{HV } 1400 \pm 30$.

Français La dynamique du jet suit le principe de Bernoulli (vitesse $\sim \sqrt{(2\Delta P/\rho)}$, $\rho \sim 1\text{ kg/m}^3 \pm 0,1\text{ kg/m}^3$), et la conductivité thermique est de $10^4\text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \pm 10^3\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. L'optimisation de la distance de pulvérisation ($250\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$) et du débit d'oxygène ($1000\text{ L/min} \pm 10\text{ L/min}$) peut réduire la porosité à $< 0,8\% \pm 0,1\%$. Par exemple, le revêtement WC12Co pulvérisé HVOF (vitesse $700\text{ m/s} \pm 10\text{ m/s}$, épaisseur $100\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$) a une dureté de $\text{HV } 1400 \pm 30$ et une porosité de $< 0,8\% \pm 0,1\%$, ce qui répond aux exigences élevées de résistance à l'usure des aubes de turbine d'aviation.

Analyse des facteurs d'influence

Les performances du revêtement sont affectées par de nombreux facteurs et doivent être contrôlées avec précision :

Vitesse de pulvérisation

Un revêtement dense (porosité $< 1\% \pm 0,2\%$) se forme à une vitesse de $700\text{ m/s} \pm 10\text{ m/s}$. En dessous de $600\text{ m/s} \pm 10\text{ m/s}$, l'énergie cinétique des particules est insuffisante et la porosité augmente jusqu'à $> 2\% \pm 0,5\%$. Au-dessus de $800\text{ m/s} \pm 10\text{ m/s}$, les particules se brisent ($< 5\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$) et la dureté diminue de $3\% \pm 0,5\%$ ($\text{HV} < 1\,200 \pm 30$).

Taille des particules de poudre

$10\text{-}45\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ assure la fluidité ($12\text{-}15\text{ secondes}/50\text{ g} \pm 0,5\text{ seconde}$) et le taux de fusion ($> 80\% \pm 2\%$). Une granulométrie $< 10\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ est volatile ($> 5\% \pm 1\%$), une porosité $> 1,5\% \pm 0,2\%$; $> 45\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ est insuffisamment fondue ($< 60\% \pm 2\%$) et la force de liaison chute à $< 40\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$.

Distance de pulvérisation

Température d'équilibre des particules : $250\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ ($\sim 2\,000\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$). Distance de pulvérisation : $< 200\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$, surchauffe ($> 3\,000\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$) entraînant une décomposition du WC ($> 1\% \pm 0,2\%$); $> 300\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$, refroidissement des particules ($< 1\,500\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

force de liaison : $< 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$.

Rugosité de la matrice

Ra 2-5 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ améliore l'enclenchement mécanique (force de liaison $> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$).
Rugosité $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, force de liaison $< 40 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$; $> 8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ induit une concentration de contrainte, taux de fissuration $> 1 \% \pm 0,2 \%$.

Débit de carburant

0,4 L/min $\pm 0,01 \text{ L/min}$ fournit une énergie stable ($> 10 \text{ MJ/kg} \pm 0,5 \text{ MJ/kg}$). Débit $< 0,3 \text{ L/min} \pm 0,01 \text{ L/min}$, porosité $> 2 \% \pm 0,5 \%$; $> 0,5 \text{ L/min} \pm 0,01 \text{ L/min}$, taux d'oxydation $> 0,1 \% \pm 0,02 \%$.

La stratégie d'optimisation

consiste à obtenir un revêtement présentant une dureté élevée (HV 1400 \pm 30) et une faible porosité ($< 0,8\% \pm 0,1\%$). Il est recommandé : d'utiliser de la poudre WC12Co avec une granulométrie de 10-30 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ pour assurer une fluidité élevée (12-15 secondes/50g \pm 0,5 secondes) et un taux de fusion ($> 80\% \pm 2\%$) ; de contrôler la vitesse de pulvérisation à 700 m/s \pm 10 m/s et la distance de pulvérisation à 250 mm \pm 5 mm ; de contrôler la rugosité du substrat à Ra 3 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ pour améliorer la force de liaison ($> 70 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) ; de régler le débit de combustible à 0,4 L/min \pm 0,01 L/min et le débit d'oxygène à 1000 L/min \pm 10 L/min ; adopter un système de contrôle en boucle fermée (écart de température $< 50 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) pour améliorer la cohérence du processus (écart de porosité $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$).

Pratique d'application technique

Le revêtement HVOF fonctionne bien dans les environnements difficiles :

Aubes de turbine d'aviation

Le revêtement WC12Co pulvérisé HVOF (épaisseur 100 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, dureté HV 1400 \pm 30) présente un taux d'usure de $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ et une durée de vie de $> 5 \text{ 000 heures} \pm 500 \text{ heures}$ dans un flux d'air à haute température de 1 000 $^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ (vitesse $> 300 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$), ce qui est beaucoup plus long que celui du substrat non revêtu ($< 2 \text{ 000 heures} \pm 200 \text{ heures}$).

Trépans de forage minier

Le revêtement WC10Co4Cr pulvérisé HVOF (porosité $< 0,8\% \pm 0,1\%$, force de liaison $> 70 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) a une durée de vie de 1 500 m $\pm 100 \text{ m}$ dans le forage de roche dure (fréquence d'impact $> 10^3 \text{ Hz} \pm 100 \text{ Hz}$), soit une augmentation de 50 % $\pm 5 \%$.

Vanne de haute mer

WCNiCr pulvérisé HVOF (épaisseur 150 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, dureté HV 1300 \pm 30) a une durée de résistance à la corrosion de $> 5 \text{ ans} \pm 0,5 \text{ an}$ dans un environnement de corrosion d'eau de mer (pH 8 $\pm 0,1$, profondeur 5 000 m $\pm 100 \text{ m}$), ce qui est meilleur que les revêtements traditionnels ($< 3 \pm 0,5 \text{ ans}$).

6.1.2 Projection plasma (APS) et projection par détonation

Principe du procédé et aperçu technique

La projection plasma (APS) et la projection par détonation sont des technologies de projection thermique à haute énergie qui entraînent le dépôt de poudre par plasma et par ondes de choc de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

détonation, respectivement, et conviennent à la modification de surface des substrats en carbure cémenté (rugosité Ra 2-5 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). L'APS utilise un flux de plasma à haute température ($> 10\,000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 100 \text{ }^\circ\text{C}$) pour faire fondre complètement la poudre afin de former un revêtement plus épais (50-300 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) ; la projection par détonation utilise une explosion à haute fréquence (5-10 Hz $\pm 0,1 \text{ Hz}$) pour produire des particules à ultra-haute vitesse (2 000-4 000 m/s $\pm 10 \text{ m/s}$) afin de former un revêtement très dense (porosité $< 0,5 \text{ \%} \pm 0,1 \text{ \%}$). L'APS est adapté aux géométries complexes (rayon de courbure $> 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$), et la projection par détonation est reconnue pour sa forte adhérence ($> 80 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$), répondant aux exigences de fiabilité élevées de l'aviation et de la haute mer. La dureté du revêtement varie de HV 1000 à 1400 ± 30 , et la résistance à l'usure et à la corrosion est considérablement améliorée.

Par exemple, le revêtement WC12Co pulvérisé APS (épaisseur 150 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) est utilisé pour les forets miniers, avec une durée de vie de 1 200 m $\pm 100 \text{ m}$; le revêtement WCNiCr pulvérisé par explosion (force de liaison $> 80 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) est utilisé pour les buses d'aviation, avec une durée de vie de $> 3\,000 \text{ heures} \pm 300 \text{ heures}$. Cette section présente les caractéristiques techniques du point de vue des paramètres du procédé, du mécanisme de dépôt et des scénarios d'application.

Paramètres du processus et mécanisme de dépôt

Projection plasma (APS)

L'APS utilise un pistolet plasma (puissance 30-100 kW $\pm 5 \text{ kW}$) pour générer un flux de plasma à haute température (température $> 10\,000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 100 \text{ }^\circ\text{C}$, vitesse 800-1200 m/s $\pm 10 \text{ m/s}$), qui fait fondre complètement la poudre (WCCo, granulométrie 15-50 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, fluidité 12-15 secondes/50g $\pm 0,5 \text{ secondes}$) (taux de fusion $> 95 \text{ \%} \pm 2 \text{ \%}$) et la dépose sur le substrat. Français Les paramètres comprennent : gaz plasma (gaz mixte Ar / H₂, débit 50-80 L/min $\pm 1 \text{ L/min}$, pureté Ar $> 99,99 \text{ \%} \pm 0,01 \text{ \%}$), distance de pulvérisation (100-150 mm $\pm 5 \text{ mm}$), paramètres de l'arc (tension 50-80 V $\pm 1 \text{ V}$, courant 500-1000 A $\pm 10 \text{ A}$). Le mécanisme de dépôt est basé sur la dynamique du plasma (densité ionique $10^{22} \text{ m}^{-3} \pm 10^{21} \text{ m}^{-3}$). Une fois la poudre complètement fondue, elle frappe le substrat pour former une couche d'éclaboussures (épaisseur 5-10 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ /couche). Après refroidissement, le revêtement a une porosité de 1 % à 2 % $\pm 0,2 \text{ \%}$ et une force de liaison de 50 à 70 MPa $\pm 5 \text{ MPa}$. Par exemple, le revêtement WC12Co pulvérisé APS (épaisseur 150 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) a une dureté de HV 1200 ± 30 et une porosité de 1,5 % $\pm 0,2 \text{ \%}$, ce qui répond aux exigences de résistance à l'usure des forets miniers.

Pulvérisation par détonation

La pulvérisation par détonation utilise un mélange combustible-oxygène (C₂H₂ / O₂, rapport 2,5:1 $\pm 0,1$) pour exploser dans une cavité fermée (pression $> 10 \text{ MPa} \pm 0,5 \text{ MPa}$, température $\sim 4000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$), entraînant la poudre (WCNiCr, taille des particules 20-50 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) pour impacter le substrat à une vitesse ultra-élevée (2000-4000 m/s $\pm 10 \text{ m/s}$). Les paramètres comprennent : la fréquence d'explosion (5-10 Hz $\pm 0,1 \text{ Hz}$), la distance de pulvérisation (150-200 mm $\pm 5 \text{ mm}$), le rapport combustible (C₂H₂ / O₂ 2,5 : 1 $\pm 0,1$). Le mécanisme repose sur la propagation d'ondes de choc (vitesse $> 3\,000 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$), la fusion partielle de la poudre (taux de fusion de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

60 à 80 % ± 2 %) et la formation de revêtements ultra-denses (porosité < 0,5 % ± 0,1 %, résistance à l'adhérence > 80 MPa ± 5 MPa). Par exemple, le revêtement WCNiCr pulvérisé par détonation (épaisseur 100 µm ± 1 µm) présente une dureté HV de 1 300 ± 30 et une résistance à l'adhérence > 80 MPa ± 5 MPa. Il est utilisé pour les tuyères d'aviation et présente une durée de vie > 3 000 ± 300 heures.

Analyse des facteurs d'influence

Projection plasma (APS)

Puissance du plasma

50 kW ± 5 kW assurent une fusion complète de la poudre (> 95 % ± 2 %). Puissance < 30 kW ± 5 kW, porosité > 3 % ± 0,5 % ; > 100 kW ± 5 kW, surchauffe du substrat (> 500 °C ± 10 °C), taux de fissuration > 0,5 % ± 0,1 %.

Distance de pulvérisation

120 mm ± 5 mm optimisent l'efficacité du dépôt (force de liaison > 60 MPa ± 5 MPa). Distance de pulvérisation < 100 mm ± 5 mm, taux de décollement du revêtement > 1 % ± 0,2 % ; > 150 mm ± 5 mm, porosité > 2 % ± 0,2 %.

Taille des particules de poudre

Fusion et dépôt équilibrés de 15 à 45 µm ± 1 µm. Granulométrie < 15 µm ± 1 µm, volatilité > 5 % ± 1 % ; > 45 µm ± 1 µm, dureté réduite de 2 % ± 0,5 % (HV < 1 100 ± 30).

Température du substrat

< 200 °C ± 10 °C éviter la concentration de contraintes (< 50 MPa ± 5 MPa) ; > 300 °C ± 10 °C, taux de fissures > 0,5 % ± 0,1 %.

Pulvérisation explosive

Fréquence d'explosion

La fréquence de 8 Hz ± 0,1 Hz contrôle l'épaisseur du revêtement (10 µm ± 0,1 µm/temps). Lorsque la fréquence est > 10 Hz ± 0,1 Hz, le taux de fissuration est > 0,5 % ± 0,1 % ; lorsqu'elle est < 5 Hz ± 0,1 Hz, l'efficacité est réduite de 30 % ± 5 %.

Distance de pulvérisation

180 mm ± 5 mm assure une adhérence (> 80 MPa ± 5 MPa). Distance de pulvérisation < 150 mm ± 5 mm, endommagement du substrat > 0,01 mm ± 0,002 mm ; > 200 mm ± 5 mm, adhérence < 60 MPa ± 5 MPa.

Rapport carburant

Le rapport C₂H₂/O₂ 2,5:1 ± 0,1 fournit une énergie stable. Écart de rapport > 0,2, taux d'oxydation > 0,2 % ± 0,02 %.

Taille des particules de poudre

Dépôt optimisé de 20 à 50 µm ± 1 µm. Granulométrie < 20 µm ± 1 µm, volatilité > 3 % ± 0,5 % ; > 50 µm ± 1 µm, porosité > 1 % ± 0,2 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Stratégie d'optimisation

APS

Sélectionnez une puissance de $50 \text{ kW} \pm 5 \text{ kW}$, une distance de pulvérisation de $120 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, une poudre de $15 \text{ à } 30 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$, un débit Ar / H₂ de $60 \text{ L/min} \pm 1 \text{ L/min}$, une température du substrat $< 200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, assurez une porosité $< 1,5\% \pm 0,2\%$ et une force de liaison $> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$.

Pulvérisation explosive

$180 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, rapport C₂H₂ / O₂ à $2,5:1 \pm 0,1$, poudre à $20\text{-}40 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, porosité à $< 0,5\% \pm 0,1\%$ et force de liaison à $> 80 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$.

Optimisation générale

La rugosité du substrat est de $R_a 3\text{-}5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ et une surveillance en ligne est adoptée (écart de température $< 50^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) pour améliorer la stabilité (écart de performance $< 1\% \pm 0,2\%$).

Pratique d'application de l'ingénierie

Buse d'aviation

WCNiCr pulvérisé par explosion (épaisseur $100 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$, force de liaison $> 80 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) a une durée de résistance à l'usure de $> 3\ 000 \text{ heures} \pm 300 \text{ heures}$ dans un flux d'air à haute température de $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, ce qui est meilleur que celui des revêtements traditionnels ($< 1\ 500 \text{ heures} \pm 200 \text{ heures}$).

Trépans de forage minier

Le revêtement WC12Co pulvérisé APS (dureté HV 1200 ± 30 , porosité $< 1,5\% \pm 0,2\%$) a une durée de vie de $1200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ dans le forage de roche dure, soit une augmentation de $40\% \pm 5\%$.

Moule résistant à l'usure

Le revêtement WC10Co4Cr pulvérisé APS (épaisseur $200 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$) a maintenu une faible usure ($< 0,07 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) lors de l'extrusion à haute fréquence ($> 10^6 \text{ fois} \pm 10^5 \text{ fois}$).

Vanne de haute mer

Le revêtement WCNiCr pulvérisé par explosion (porosité $< 0,5\% \pm 0,1\%$) a une durée de vie de $> 5 \text{ ans} \pm 0,5 \text{ an}$ en cas de corrosion par l'eau de mer (pH $8 \pm 0,1$).

6.2 Matériaux de revêtement

Les matériaux de revêtement sont essentiels pour améliorer les performances du carbure cémenté. En optimisant la composition et la structure de la phase dure (WC, TiC) et de la phase liante (Co, NiCr, Ni), il est possible d'obtenir une dureté élevée (HV $1200\text{-}1500 \pm 30$), une excellente ténacité ($K_{Ic} 10\text{-}15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) et une excellente résistance à la corrosion (taux de corrosion $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,002 \text{ mm/an}$). Il est nécessaire d'équilibrer dureté et ténacité, de contrôler l'énergie d'interface ($< 1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$) et l'écart de dilatation thermique ($< 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), et de s'adapter aux conditions de travail complexes de l'aviation, de l'exploitation minière et des grands fonds. Le revêtement WCCo est connu pour sa dureté élevée, le revêtement WCNiCr améliore la résistance à la corrosion et le revêtement multiphasé WCTiCNi prend en compte la dureté et la ténacité, élargissant les scénarios d'application.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Français Cette section aborde les stratégies et les pratiques d'ingénierie sous deux aspects : l'optimisation de la composition des revêtements WCCo et WCNiCr et des revêtements composites multiphasés (WCTiCNi). Combinant l'analyse du diagramme de phase (liquidus WCCo 1320°C±5°C), la cinétique de diffusion (coefficient 10^{-10} cm²/s± 10^{-11} cm²/s) et le modèle mécanique (renforcement Orowan). Par exemple, le revêtement WC12Co (dureté HV 1300±30) est utilisé pour les aubes de turbines d'aviation, avec un taux d'usure de < 0,05 mm³/N·m ± 0,01 mm³/N·m ; le revêtement WC10Co4Cr (taux de corrosion < 0,01 mm/an ± 0,002 mm/an) est utilisé pour les vannes en eaux profondes ; Le revêtement WCTiCNi (K_{1c} 12 MPa·m^{1/2} ± 0,5) augmente la durée de vie des forets miniers à 1 500 m ± 100 m.

6.2.1 Optimisation de la composition des revêtements WCCo et WCNiCr

Principe et aperçu technique

WCCo et WCNiCr sont les choix les plus courants pour la modification de surface du carbure cémenté. En ajustant le rapport entre la phase dure (WC, fraction volumique 70 %-90 % ± 1 %) et la phase de liaison (Co, NiCr, 10 %-30 % ± 1 %), les performances sont optimisées pour s'adapter à différentes conditions de travail. Le revêtement WCCo est reconnu pour sa dureté et sa résistance à l'usure élevées, tandis que le revêtement WCNiCr est performant en environnement corrosif. L'objectif est d'obtenir une amélioration synergique de la dureté (HV 1200-1500 ± 30), de la ténacité (K_{1c} 10-15 MPa·m^{1/2} ± 0,5) et de la résistance à la corrosion, tout en garantissant la force de liaison entre le revêtement et le substrat (> 60 MPa ± 5 MPa).

WCCo offre une résistance à l'usure avec WC (dureté HV > 2000 ± 50, granulométrie 0,5-2 μm ± 0,01 μm) et Co (10 %-20 % ± 1 %, ténacité K_{1c} > 20 MPa·m^{1/2} ± 0,5) pour améliorer la liaison de l'interface (énergie de l'interface < 1 J/m² ± 0,1 J/m²). Le revêtement WCNiCr remplace le Co par NiCr (Ni 8 %-15 % ± 1 %, Cr 2 %-5 % ± 0,5 %), et Cr forme une couche de passivation Cr₂O₃ (épaisseur < 10 nm ± 1 nm), ce qui améliore considérablement la résistance à la corrosion (taux de corrosion < 0,01 mm/an ± 0,002 mm/an). L'optimisation est basée sur le diagramme de phase (WCCo liquidus ~1320°C±5°C) et le renforcement de l'Orowan (espacement des grains < 1μm±0,01μm), prenant en charge les applications aéronautiques et en haute mer.

Optimisation de la composition et analyse des mécanismes

Le revêtement

WCCo dépend du rapport WC/Co : la phase dure WC (fraction volumique 80 % ± 1 %, granulométrie 0,5-2 μm ± 0,01 μm) offre une dureté élevée (HV > 2 000 ± 50) ; la phase liante Co (teneur 12 % ± 1 %) améliore la liaison de l'interface (> 60 MPa ± 5 MPa) et améliore la ténacité (K_{1c} 12 MPa·m^{1/2} ± 0,5). Une teneur en Co trop élevée (> 20 % ± 1 %) réduit la dureté (HV < 1 100 ± 30), une teneur en Co trop faible (< 8 % ± 1 %) augmente la porosité (> 2 % ± 0,5 %). Le revêtement WC12Co optimisé (pulvérisation HVOF, vitesse 700 m/s±10 m/s) a une dureté de HV 1300±30, une porosité de < 0,8%±0,1% et un taux d'usure de < 0,05 mm³/N·m ± 0,01 mm³/N·m,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ce qui convient aux aubes de turbines d'aviation ($1000^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$).

Revêtement

WCNiCr Le revêtement WCNiCr améliore la résistance à la corrosion en remplaçant le Co par du NiCr : la base Ni ($8\% - 15\% \pm 1\%$) offre une ténacité ($K_{Ic} > 15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) et une force de liaison ($> 50\text{MPa} \pm 5\text{MPa}$) ; l'ajout de Cr ($4\% \pm 0,5\%$) forme une couche de passivation Cr_2O_3 , un gain de poids anti-oxydation $< 0,05\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01\text{mg}/\text{cm}^2$ et une résistance à la corrosion améliorée de $30\% \pm 5\%$ (pH 4-10 $\pm 0,1$). Le revêtement WC10Co4Cr (HVOF, porosité $< 0,8\% \pm 0,1\%$) a une dureté de HV 1200 ± 30 et un taux de corrosion de $< 0,01\text{mm}/\text{an} \pm 0,002\text{mm}/\text{an}$. Il est utilisé pour les vannes en eau profonde avec une durée de vie de $> 5\text{ans} \pm 0,5\text{an}$.

Analyse des facteurs d'influence

Taille des particules de WC

0,5-2 $\mu\text{m} \pm 0,01\mu\text{m}$ optimise la dureté (HV $> 1200 \pm 30$). Granulométrie $< 0,5\mu\text{m} \pm 0,01\mu\text{m}$, taux de décomposition $> 2\% \pm 0,5\%$; $> 2\mu\text{m} \pm 0,01\mu\text{m}$, ténacité diminuée de $3\% \pm 0,5\%$.

Teneur en phase liante

Co $12\% \pm 1\%$, NiCr $12\% \pm 1\%$ (Cr $4\% \pm 0,5\%$) Performances équilibrées. Co/ NiCr $< 8\% \pm 1\%$, porosité $> 2\% \pm 0,5\%$; $> 20\% \pm 1\%$, la dureté diminue de $10\% \pm 2\%$.

Teneur en Cr

$4\% \pm 0,5\%$ améliore la résistance à la corrosion ; $> 6\% \pm 0,5\%$ forme du Cr_3C_2 cassant avec une dureté de $< 1000 \pm 50$.

Procédé de pulvérisation : HVOF (700 m/s ± 10 m/s) est meilleur que l'APS, avec une porosité $< 1\% \pm 0,2\%$ contre $> 1,5\% \pm 0,2\%$.

Température de la matrice : $< 200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ pour éviter les contraintes ($< 50\text{MPa} \pm 5\text{MPa}$) ; $> 300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, taux de fissures $> 0,5\% \pm 0,1\%$.

Français La stratégie d'optimisation

utilise des grains WC de $0,5-1\mu\text{m} \pm 0,01\mu\text{m}$, Co $12\% \pm 1\%$ ou NiCr $12\% \pm 1\%$ (Cr $4\% \pm 0,5\%$) ; la pulvérisation HVOF (vitesse 700 m/s ± 10 m/s, distance de pulvérisation 250 mm ± 5 mm) est utilisée pour réduire la porosité ($< 0,8\% \pm 0,1\%$) ; rugosité du substrat Ra $3\mu\text{m} \pm 0,1\mu\text{m}$, température de préchauffage $150^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, amélioration de la force de liaison ($> 70\text{MPa} \pm 5\text{MPa}$) ; l'ajout de $0,5\% \pm 0,01\%$ de VC inhibe la décomposition du WC ($< 0,5\% \pm 0,1\%$) et augmente la dureté de $3\% \pm 0,5\%$; et une surveillance en ligne est mise en œuvre (écart de température $< 50^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) pour garantir la cohérence (écart de performance $< 1\% \pm 0,2\%$).

Pratique d'application de l'ingénierie

Aubes de turbine d'aviation

Revêtement WC12Co (dureté HV 1300 ± 30 , taux d'usure $< 0,05\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durée de vie >5000 heures±500 heures.

Vanne de haute mer

Revêtement WC10Co4Cr (taux de corrosion < 0,01 mm/an ± 0,002 mm/an), durée de vie > 5 ans ± 0,5 an.

Trépans de forage minier

Revêtement WC15Co (ténacité K_{1c} 12 MPa·m^{1/2} ± 0,5), durée de vie > 1500 m ± 100 m, améliorée de 50 % ± 5 %.

6.2.2 Revêtement composite multiphasé (WCTiCNi)

Aperçu du principe et de la technologie des revêtements composites multiphasés

Le revêtement composite multiphasé (WCTiCNi) introduit du TiC (dureté HV>2500±50, fraction volumique 5%-20%±1%) et du Ni (8%-15%±1%) pour améliorer la dureté (HV 1300-1500±30), la ténacité (K_{1c} 10-15 MPa·m^{1/2} ± 0,5) et la résistance à l'usure (taux d'usure < 0,04 mm³/N·m ± 0,01 mm³/N·m) sur la base du revêtement à base de WC (0,5-2µm±0,01µm). Comparé au revêtement WCCo simple, le revêtement WCTiCNi a une densité plus faible (~10 g/cm³ ± 0,1 g/cm³ contre 15 g/cm³ ± 0,1 g/cm³), une résistance à l'oxydation plus forte (gain de poids d'oxydation < 0,05 mg/cm² ± 0,01 mg/cm²) et convient aux environnements à fort impact et corrosifs.

Français Les performances sont optimisées par le renforcement des composites (ancrage des joints de grains TiC) et l'ingénierie de l'interface (énergie d'interface WC/ TiC < 0,8 J/m² ± 0,1 J/m²). Le WC apporte une dureté de base, le TiC réduit la densité et améliore la résistance à l'oxydation, et le Ni améliore la ténacité et la résistance à la corrosion. Par exemple, le revêtement WC10TiC12Ni pulvérisé HVOF (TiC 10 % ± 1 %) présente une dureté de HV 1400 ± 30 et une porosité de < 1 % ± 0,2 %, et est utilisé dans les forêts minières avec une durée de vie de > 1500 m ± 100 m.

Optimisation de la composition et analyse des mécanismes des revêtements composites multiphasés

Les performances dépendent de la proportion de chaque phase et de la microstructure

WC/ TiC (fraction volumique WC 70%-85%±1%) assure la dureté (HV>2000±50), TiC (10%±1%, masse volumique 4,9 g/cm³ ± 0,1 g/cm³) améliore la résistance à l'oxydation (gain de poids d'oxydation < 0,05 mg/cm² ± 0,01 mg/cm²); la phase liante Ni (12%±1%) assure la ténacité (K_{1c} > 15 MPa·m^{1/2} ± 0,5) et la résistance à la corrosion (taux de corrosion < 0,01 mm/an±0,002 mm/an). L'optimisation est basée sur le renforcement Orowan (espacement des grains < 1µm±0,01µm) et l'analyse du diagramme de phase (WCTiCNi liquidus ~1350°C±5°C). Le revêtement WC10TiC12Ni (HVOF, porosité < 1%±0,2%) a une dureté de HV 1400±30, une ténacité de K_{1c} 12 MPa·m^{1/2} ± 0,5 et un taux d'usure de < 0,04 mm³/N·m ± 0,01 mm³/N·m.

Analyse des facteurs d'influence

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Teneur en TiC

10%±1% équilibre la dureté et la ténacité. >20%±1%, une phase cassante se forme ($K_{1c} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) ; <5%±1%, dureté insuffisante (HV<1200±30).

Teneur en Ni

12%±1% optimise la force de liaison (>60 MPa±5 MPa). >15%±1%, la dureté diminue de 5%±1% ; <8%±1%, porosité>2%±0,5%.

Taille des particules

WC/ TiC 0,5-1µm±0,01µm assure l'uniformité (écart <5%±1%). >2µm±0,01µm, la ténacité diminue de 3%±0,5%.

Procédé de pulvérisation

HVOF (700 m/s±10 m/s) contrôle la décomposition du TiC (<1%±0,2%) ; APS (>10000°C±100°C), taux de décomposition >3%±0,5%.

Préchauffage du substrat

150°C±10°C améliore la force de liaison (>70 MPa±5 MPa) ; >200°C±10°C, contrainte >50 MPa±5 MPa.

Français La stratégie d'optimisation

utilise des grains WC/ TiC de 0,5-1µm±0,01µm, TiC 10%±1% et Ni 12%±1% ; la pulvérisation HVOF (vitesse 700 m/s±10 m/s, distance de pulvérisation 250 mm±5 mm) est utilisée pour contrôler la porosité (<1%±0,2%) ; rugosité du substrat Ra 3µm±0,1µm, température de préchauffage 150°C±10°C ; 0,3%±0,01% de VC est ajouté pour inhiber la décomposition du TiC (<0,5%±0,1%) et augmenter la dureté de 3%±0,5% ; les paramètres d'optimisation AI sont mis en œuvre (écart <1%±0,2%) pour améliorer la cohérence.

Pratique d'application de l'ingénierie

Trépan de forage minier

Revêtement WC10TiC12Ni (dureté HV 1400±30, taux d'usure <0,04 mm³ / N · m ± 0,01 mm³ / N · m), durée de vie >1500 m±100 m, une augmentation de 50%±5%.

Moule résistant à l'usure

Revêtement WC15TiC10Ni (ténacité K_{1c} 12 MPa · m^{1/2} ± 0,5), durée de vie > 10⁶ fois ± 10⁵ fois.

Buse d'aviation

Revêtement WC10TiC12Ni (résistance à l'usure < 0,04 mm³ / N · m ± 0,01 mm³ / N · m), durée de vie > 3000 heures ± 300 heures.

6.3 Carbures cémentés à gradient et nanostructurés

Le carbure cémenté à gradient et nanostructuré améliore considérablement la dureté (HV 2000-3000±50), la ténacité (K_{1c} 10-20 MPa · m^{1/2} ± 0,5) et la résistance à la fatigue thermique (durée de vie > 10⁵ fois±10⁴ fois) grâce à l'ingénierie d'interface (gradient WCCo, Co 0-20% ± 1%) et au renforcement nanocristallin (WC <100 nm±5 nm). La structure à gradient atténue les déséquilibres de dilatation thermique (<5×10⁻⁶ K⁻¹ ± 0,5×10⁻⁶ K⁻¹) grâce à un changement progressif de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

composition, et la nanostructure améliore la résistance ($>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) grâce au renforcement des joints de grains (effet Hall-Petch, $\sigma_y \sim d^{-1/2}$), et fonctionne bien dans l'aviation, l'exploitation minière et la fabrication électronique.

Français Cette section commence par l'ingénierie d'interface du WCCo à gradient et la préparation et les défis du nano WC ($<100 \text{ nm}$), combinant la thermodynamique (énergie d'interface $<1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$), la cinétique (taux d'agglomération $\sim 10^{-9} \text{ m/s} \pm 10^{-10} \text{ m/s}$) et le modèle mécanique (renforcement Orowan) pour explorer les principes et les pratiques. Par exemple, le WCCo à gradient (Co 5%-15% $\pm 1\%$) est utilisé pour les forêts minières, et la durée de vie de l'impact est $>1800 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$; le revêtement nano WC ($<100 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$) est utilisé pour les forêts PCB, et la durée de vie est $>10^5$ trous $\pm 10^4$ trous.

6.3.1 Ingénierie d'interface du WCCo à gradient

Principe et aperçu technique

Le WCCo à gradient optimise la contrainte d'interface ($<50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$), améliore la force de liaison ($>80 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) et la résistance à la fatigue thermique ($>10^5$ fois $\pm 10^4$ fois) en faisant varier progressivement la teneur en Co (0-20% $\pm 1\%$, épaisseur du gradient 0,5-2 mm $\pm 0,01 \text{ mm}$). Par rapport au WCCo uniforme, la structure à gradient atténue les différences de dilatation thermique (WC $4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, Co $13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), réduit les fissures d'interface ($<0,1\% \pm 0,02\%$), prend en compte la dureté de surface (HV 1800 ± 30) et la ténacité interne ($K_{Ic} 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), et convient aux environnements à fort impact.

La méthode de préparation comprend le laminage de poudres et la réaction in situ. Le laminage de poudres consiste à empiler des poudres présentant différents teneurs en cobalt (5 %-15 % ± 1 %) en couches.

Français Les gradients continus sont formés par pressage isostatique à froid (CIP, 250 MPa $\pm 5 \text{ MPa}$) et frittage sous vide (1450°C $\pm 10^\circ\text{C}$); les réactions in situ génèrent des couches de gradient par diffusion de carbure (taux $\sim 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$). La stabilité est assurée sur la base de la thermodynamique de l'interface (énergie de l'interface $<1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$). Par exemple, le WCCo à gradient (Co 5%-15% $\pm 1\%$) est utilisé dans les forêts minières avec une durée de vie d'impact $>1800 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$.

Analyse du processus de préparation et du mécanisme

Préparation de la poudre : Sélectionnez WC (0,5-1 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et Co (5 %-15 % ± 1 %), et le rapport de couches (écart $< 1\% \pm 0,2\%$).

Moulage : moulage CIP (250 MPa $\pm 5 \text{ MPa}$), densité verte $> 99\% \pm 0,1\%$.

Frittage : Frittage sous vide (1450°C $\pm 10^\circ\text{C}$, pression $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$), gradient de formation par diffusion du Co (vitesse $\sim 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$).

Post-traitement : Traitement thermique (600°C $\pm 10^\circ\text{C}$) pour éliminer les contraintes résiduelles (<20

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MPa±5 MPa).

Le mécanisme repose sur l'atténuation des déséquilibres de dilatation thermique et la cinétique de diffusion. Le gradient de Co (5 %-15 % ± 1 %) uniformise la répartition des contraintes (< 50 MPa ± 5 MPa) et l'énergie d'interface < 1 J/m² ± 0,1 J/m² assure la résistance de liaison (> 80 MPa ± 5 MPa). Par exemple, le WCCo à gradient (épaisseur de couche 1 mm ± 0,01 mm) présente une dureté de HV 1800 ± 30 et une ténacité de K_{1c} c 15 MPa·m^{1/2} ± 0,5.

Analyse des facteurs d'influence

% ±1% optimise la contrainte (<50 MPa±5 MPa). >20%±1%, la ténacité est trop élevée (K_{1c} > 20 MPa·m^{1/2} ± 0,5), la dureté diminue de 5%±1% ; <5%±1%, concentration de contrainte (>100 MPa±5 MPa).

Épaisseur de couche : 1 mm ± 0,01 mm pour assurer la continuité (écart < 1 % ± 0,2 %). < 0,5 mm ± 0,01 mm, concentration de contrainte (> 100 MPa ± 5 MPa) ; > 2 mm ± 0,01 mm, flou de gradient (> 5 % ± 1 %).

Température de frittage : 1450°C±10°C diffusion contrôlée (>10⁻¹⁰ cm² /s±10⁻¹¹ cm² /s). >1500°C±10°C, gradient flou (>5%±1%) ; <1400°C±10°C, force de liaison <60 MPa±5 MPa.

Taille des particules de poudre : WC 0,5-1 μm ± 0,01 μm améliore l'uniformité. > 2 μm ± 0,01 μm, défauts d'interface > 1 % ± 0,2 %.

Additif : 0,5 % ± 0,01 % VC inhibe la croissance des grains (< 0,5 ± 0,01 μm) et augmente la dureté de 3 % ± 0,5 %.

La stratégie d'optimisation

a sélectionné une teneur en Co de 5%-15%±1%, une épaisseur de couche de 1 mm±0,01 mm et une taille de particules de WC de 0,5-1μm±0,01μm ; une température de frittage de 1450°C±10°C et une pression de <10⁻³ Pa ± 10⁻⁴ Pa ; l'ajout de 0,5%±0,01% de VC pour inhiber la croissance des grains et augmenter la dureté de 3%±0,5% ; une surveillance en ligne (écart de température <10°C±2°C) pour améliorer la stabilité (écart de performance <1%±0,2%) ; un traitement thermique post-traitement (600°C±10°C) pour éliminer les contraintes résiduelles (<20 MPa±5 MPa).

Pratique d'application de l'ingénierie

Trépan de forage minier

Gradient WCCo (Co 5%-15%±1%, dureté HV 1800±30), dans le forage de roche dure (fréquence d'impact>10³ Hz ± 100 Hz), durée de vie>1800 m±100 m, une augmentation de 60%±5%.

Moule résistant à l'usure

Gradient WCCo (ténacité K_{1c} 15 MPa·m^{1/2} ± 0,5), durée de vie > 10⁶fois ± 10⁵ fois .

Outils d'aviation

Le WCCo à gradient (contrainte < 50 MPa ± 5 MPa), en coupe à grande vitesse (> 1 000 m/min ± 10 m/min), a une durée de vie de > 20 heures ± 1 heure, ce qui est meilleur que celle d'une structure uniforme (< 10 heures ± 1 heure).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.2 Préparation et défis du Nano-WC (<100 nm)

Présentation du principe et de la technologie Nano

Français Le WC (grains <100 nm±5 nm) est préparé par broyage à billes à haute énergie, synthèse plasma ou dépôt chimique en phase vapeur (CVD), avec une dureté de HV 2500-3000±50 et une résistance de >5000 MPa±100 MPa, basée sur l'effet Hall-Petch ($\sigma_y \sim d^{-1/2}$, densité des joints de grains $>10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$). Comparé au WC traditionnel (0,5-2 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), le renforcement des joints de grains nano WC améliore considérablement la résistance et maintient la ténacité (K_{1c} 10-15 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Les revêtements Nano-WC (épaisseur 10-50 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) fonctionnent bien dans la fabrication électronique et l'ingénierie sous-marine, comme les forets PCB (durée de vie > 10^5 trous $\pm 10^4$ trous).

défis tels que l'agglomération (vitesse $\sim 10^{-9} \text{ m/s} \pm 10^{-10} \text{ m/s}$), l'oxydation (O>0,1%±0,02%) et la croissance des grains par frittage (>200 nm±10 nm). L'objectif est de contrôler la taille des grains (<100 nm±5 nm) et d'améliorer les performances grâce à l'optimisation du procédé et aux additifs (VC, Cr₃C₂).

Analyse du processus de préparation et du mécanisme

Broyage à boulets à haute énergie

La poudre de WC (taille initiale des particules 1-10 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) a été broyée dans un broyeur planétaire (vitesse 300-500 tr/min±10 tr/min, rapport billes/poudre 10:1±0,1) pendant 20-50 h±1 h, et la taille des grains a été réduite à <100 nm±5 nm, avec une contribution de renforcement des joints de grains d'environ 500 MPa±50 MPa.

Synthèse du plasma

WCl₆ réagit avec CH₄ (débit 1:1±0,1) dans le plasma (>10000°C±100°C) pour générer du nano-WC (<80 nm±5 nm) avec un taux de dépôt de >90%±2 %.

maladies cardiovasculaires

W(CO)₆ réagit avec H₂ (800 -1000°C±10°C) pour déposer un revêtement WC (grains <100 nm±5 nm, épaisseur 10-50 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$).

Français Le mécanisme est basé sur le renforcement des joints de grains et la cinétique d'agglomération. L'effet Hall-Petch augmente la résistance à mesure que la taille des grains diminue ($\sigma_y \sim d^{-1/2}$). La vitesse d'agglomération ($\sim 10^{-9} \text{ m/s} \pm 10^{-10} \text{ m/s}$) est déterminée par l'énergie de surface ($\sim 1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$) et contrôlée par l'ajout de dispersant (PVA, 0,5 % $\pm 0,01$ %). Par exemple, la dureté du revêtement nano-WC CVD (< 80 nm ± 5 nm) est HV 2500 ± 50 et la ténacité est K_{1c} 12 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$.

Analyse des facteurs d'influence

Taille des grains

<100 nm±5 nm nécessite un meulage à haute énergie (>50 heures±1 heure). >100 nm±5 nm, la dureté diminue de 10%±2%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Réunion

Sans dispersant, le taux d'agglomération est $> 20 \% \pm 2 \%$; en ajoutant $0,5 \% \pm 0,01 \%$ de PVA, le taux d'agglomération est $< 5 \% \pm 1 \%$.

Température de frittage

$< 1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ inhibe la croissance des grains ($< 150 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$) ; $> 1300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, la taille des grains est $> 200 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ et la dureté diminue de $15\% \pm 2\%$.

atmosphère

Ar /H₂ (O₂ $< 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$) éviter l'oxydation (O $< 0,05\% \pm 0,01\%$). O₂ $> 100 \text{ ppm} \pm 10 \text{ ppm}$, taux d'oxydation $> 0,2\% \pm 0,02\%$.

additif

$0,3 \% \pm 0,01 \%$ VC contrôle la taille des grains ($< 100 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$) et augmente la dureté de $5 \% \pm 1 \%$.

La stratégie d'optimisation

utilise un broyage à billes à haute énergie (50 heures \pm 1 heure, vitesse de rotation $400 \text{ tr/min} \pm 10 \text{ tr/min}$), granulométrie $< 100 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$; température de frittage $< 1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, atmosphère Ar /H₂ (O₂ $< 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$) ; ajout de $0,5 \% \pm 0,01 \%$ de dispersant PVA, taux d'agglomération $< 5 \% \pm 1 \%$; ajout de $0,3 \% \pm 0,01 \%$ de VC pour inhiber la croissance des grains et augmenter la dureté de $5 \% \pm 1 \%$; surveillance en ligne de la taille des particules (écart $< 5 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) pour assurer la stabilité.

Pratique d'application de l'ingénierie

Foret pour PCB

Revêtement Nano WC (grain $< 80 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$, dureté HV 2500 ± 50), durée de vie $> 10^5$ trous $\pm 10^4$ trous, amélioré de $100\% \pm 10\%$.

Vanne de haute mer

Revêtement Nano WC (taux de corrosion $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,002 \text{ mm/an}$), durée de vie $> 5 \text{ ans} \pm 0,5 \text{ an}$.

Outils d'aviation

Le revêtement Nano-WC (résistance $> 5000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) et la durée de vie $> 20 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$ sont meilleurs que le revêtement traditionnel ($< 10 \text{ heures} \pm 1 \text{ heure}$).

6.4 Test de performance du revêtement

Le test de performance du revêtement adopte des méthodes standardisées (ASTM G65, ISO 6508, ASTM E384) pour évaluer les indicateurs clés, notamment la force de liaison ($50-80 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$), la porosité ($< 1\% \pm 0,2\%$), la dureté (HV $1200-1500 \pm 30$), la résistance à l'usure (taux d'usure $< 0,06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) et la résistance à la corrosion (taux de corrosion $< 0,01 \text{ mm/an} \pm 0,002 \text{ mm/an}$), garantissant que le revêtement répond aux exigences de fiabilité de l'aviation, de l'exploitation minière et des champs sous-marins, tout en fournissant des données pour l'optimisation des processus.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Français Cette section traite de la technologie et de la pratique des tests du point de vue de la force de liaison, de la porosité et de la résistance à l'usure, en combinant la mécanique de la rupture (K_{IC} 10-15 MPa·m^{1/2} ± 0,5), la science des surfaces (angle de contact < 10° ± 1°) et l'analyse statistique (erreur ± 0,01 mm³ / N·m). Par exemple, le revêtement HVOF WC12Co (force de liaison > 70 MPa ± 5 MPa) est utilisé pour les aubes de turbine d'aviation, avec une durée de vie de > 5 000 heures ± 500 heures; le revêtement nano WC (porosité < 0,5 % ± 0,1 %) est utilisé pour les forets PCB, avec une durée de vie de > 10⁵ trous ± 10⁴ trous.

6.4.1 Force de liaison (50-80 MPa) et porosité (<1%)

Principe du test et aperçu de la technologie :

la force de liaison et la porosité sont les indicateurs clés de la fiabilité du revêtement, qui influencent directement sa résistance à l'arrachement et sa durabilité. La force de liaison reflète la force de liaison interfaciale, tandis que la porosité mesure la densité. Des méthodes normalisées garantissent la répétabilité et la comparabilité des résultats.

Résistance de liaison (ASTM C633) : L'essai de traction (vitesse de 0,5 mm/min ± 0,01 mm/min) mesure la force de séparation, résistance 50-80 MPa ± 5 MPa. L'échantillon (diamètre 25 mm ± 0,1 mm, épaisseur du revêtement 100-200 µm ± 1 µm) est fixé avec un adhésif haute résistance (> 100 MPa ± 5 MPa), et la formule de calcul est $\sigma = F/A$.

Porosité (ASTM E2109) : Un microscope électronique à balayage (MEB, résolution < 0,1 µm ± 0,01 µm) a été utilisé pour analyser la section transversale et mesurer le taux de porosité (< 1 % ± 0,2 %). L'échantillon a été poli à Ra < 0,05 µm ± 0,01 µm et calculé en fonction du rapport de surface.

Par exemple, le revêtement HVOF WC12Co (force de liaison > 70 MPa ± 5 MPa, porosité < 0,8 % ± 0,1 %) est utilisé pour les aubes de turbine d'aviation, et la durée de vie anti-écaillage est > 5 000 heures ± 500 heures.

Méthodes d'essai et analyse des mécanismes

Force de liaison

Français Sur la base de la mécanique de la rupture (K_{IC} 10-15 MPa·m^{1/2} ± 0,5), la force de liaison interfaciale est déterminée par emboîtement mécanique (Ra 2-5 µm ± 0,1 µm) et microdiffusion (< 1 µm ± 0,1 µm). Le processus comprend la préparation de l'échantillon (épaisseur 100-200 µm ± 1 µm), la fixation et l'étirement (vitesse 0,5 mm/min ± 0,01 mm/min). Le revêtement HVOF (vitesse 700 m/s ± 10 m/s) a une force de liaison > 70 MPa ± 5 MPa, ce qui est meilleur que l'APS (< 60 MPa ± 5 MPa).

Porosité

D'après l'analyse d'images MEB (grossissement > 1000×±100×), les pores sont représentés par des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zones sombres, et le rapport de surface est calculé par logiciel. La porosité HVOF est inférieure à $1\% \pm 0,2\%$, ce qui est supérieur à celle de l'APS ($\sim 1,5\% \pm 0,2\%$).

Analyse des facteurs d'influence

Force de liaison

La rugosité de la matrice $Ra\ 3-5\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ améliore la résistance ($> 70\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$) ; $< 2\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$, $< 50\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$. La vitesse de pulvérisation de $700\ \text{m/s} \pm 10\ \text{m/s}$ est supérieure à celle de l'APS ; la température de préchauffage de $150\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$ améliore la diffusion.

Porosité

La puissance de pulvérisation de $100\ \text{kW} \pm 10\ \text{kW}$ (HVOF) est meilleure que celle de $50\ \text{kW} \pm 5\ \text{kW}$ (APS) ; la granulométrie de poudre de $10-30\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ réduit la porosité ; la distance de pulvérisation optimise la densité.

Stratégie d'optimisation

rugosité du substrat $Ra\ 3-5\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$, température de préchauffage $150\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$; HVOF (vitesse $700\ \text{m/s} \pm 10\ \text{m/s}$, puissance $100\ \text{kW} \pm 10\ \text{kW}$), poudre $10-30\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$; distance de pulvérisation APS $120\ \text{mm} \pm 5\ \text{mm}$; distance de pulvérisation par explosion $180\ \text{mm} \pm 5\ \text{mm}$; SEM de haute précision et équipement d'étirement pour garantir la précision.

Pratique d'application de l'ingénierie

Aubes de turbine d'aviation

Revêtement HVOF WC12Co (force de liaison $> 70\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$, porosité $< 0,8\% \pm 0,1\%$), durée de vie $> 5\ 000\ \text{heures} \pm 500\ \text{heures}$.

Vanne de haute mer

Revêtement HVOF WC10Co4Cr (force de liaison $> 70\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$), durée de vie $> 5\ \text{ans} \pm 0,5\ \text{an}$.

Trépan de forage minier

WCNiCr pulvérisé par explosion (force de liaison $> 80\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$, porosité $< 0,5\% \pm 0,1\%$), durée de vie $> 1\ 500\ \text{m} \pm 100\ \text{m}$.

6.4.2 Résistance à l'usure (ASTM G65, taux d'usure $< 0,06\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$)

Principe du test et aperçu technique :

La résistance à l'usure est l'indicateur clé pour évaluer les performances des revêtements et affecte directement leur durée de vie dans les environnements à frottement élevé. L'essai ASTM G65 sur sable sec et roue en caoutchouc simule l'usure par abrasion et mesure le taux d'usure ($< 0,06\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), fournissant ainsi une base pour l'optimisation des procédés et le choix des matériaux.

Processus de test

Français L'échantillon ($50 \times 25 \times 10\ \text{mm} \pm 0,1\ \text{mm}$, épaisseur $100-200\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$) a été frotté dans un flux de sable (SiO_2 , granulométrie $200-300\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$, débit $300\ \text{g/min} \pm 10\ \text{g/min}$) (vitesse de la roue

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

200 tr/min \pm 1 tr/min, charge 130 N \pm 1 N, 6000 tours \pm 10 tours). Le volume d'usure a été calculé par perte de masse ($V = \Delta m / \rho$, $\rho = 14-15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$), et le taux d'usure= $V/(F \cdot S)$. Par exemple, le revêtement HVOF WC12Co (taux d'usure $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) a une durée de vie de $> 5\,000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$.

La méthode d'essai et l'analyse du mécanisme

sont basées sur le modèle d'Archard ($V = k \cdot F \cdot S / H$, $k = 10^{-4} \pm 10^{-5}$, $H = \text{HV } 1200-1500 \pm 30$). Plus la dureté est élevée et plus la porosité est faible, plus la résistance à l'usure est forte. Le processus comprend la préparation de l'échantillon, le réglage des paramètres et le calcul du taux d'usure. Le taux d'usure du revêtement HVOF (dureté HV 1400 \pm 30) est $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, ce qui est meilleur que celui de l'APS ($> 0,07 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$).

Analyse des facteurs d'influence

dureté

HV 1400 \pm 30 réduit le taux d'usure ($< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$); $< 1200 \pm 30$, $> 0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$.

Porosité

$< 1\% \pm 0,2\%$ améliore la résistance à l'usure; $> 2\% \pm 0,5\%$, le taux d'usure augmente de $20\% \pm 5\%$.

épaisseur

100-200 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ équilibre la résistance à l'usure et les contraintes.

Technologie

Le HVOF est meilleur que l'APS; la taille des particules de WC de $0,5 \text{ à } 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ améliore la résistance à l'usure.

La stratégie d'optimisation

utilise HVOF (vitesse $700 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$), granulométrie WC $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, épaisseur $100-200 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$; ajout de $0,3\% \pm 0,01\%$ de VC ou de TiC ($5\%-10\% \pm 1\%$) pour améliorer la dureté; surveillance en ligne pour assurer la stabilité.

Pratique d'application de l'ingénierie

Aubes de turbine d'aviation: revêtement HVOF WC12Co, durée de vie $> 5000 \text{ heures} \pm 500 \text{ heures}$.

Foret minier: revêtement WC10TiC12Ni, durée de vie $> 1500 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$.

Foret PCB: revêtement Nano WC, durée de vie $> 10^5 \text{ trous} \pm 10^4 \text{ trous}$.

Résumé et perspectives

Grâce à l'optimisation des procédés, à la conception des matériaux et à l'innovation structurelle, la technologie des revêtements et des composites a permis de réaliser des avancées majeures en matière de résistance à l'usure, à la corrosion et à la fatigue thermique du carbure cémenté, répondant ainsi aux besoins de divers secteurs. À l'avenir, elle favorisera le développement de la pulvérisation intelligente, des revêtements composites PVD/CVD, des revêtements verts et des revêtements nanocomposites, et améliorera encore les performances et le champ d'application.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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:

Qu'est-ce qu'un revêtement en carbure cémenté

1. Définition

Un revêtement en alliage dur est un revêtement déposé à la surface d'un substrat par un procédé spécial. Son composant principal est un matériau composite composé d'un alliage dur (tel que le carbure, le nitrure ou le borure) et d'un liant métallique (tel que le cobalt ou le nickel). Les revêtements en alliage dur utilisent généralement du carbure de tungstène (WC), du carbure de titane (TiC) ou du carbure de chrome (Cr₃C₂) comme phase dure principale. Ils présentent une dureté, une résistance à l'usure et une résistance à la corrosion extrêmement élevées et sont largement utilisés pour améliorer les propriétés de surface des substrats.

2. Composition

Phase difficile :

Ingrédients principaux : carbure de tungstène (WC), carbure de titane (TiC), carbure de chrome (Cr₃C₂), etc.

Caractéristiques : Dureté élevée (HV 1000-3000), point de fusion élevé (≥ 2000 °C), excellente résistance à l'usure (Wear Resistance).

Phase liante :

Matériaux courants : cobalt (Co), nickel (Ni), fer (Fe) ou leurs alliages.

Fonction : lie les particules de phase dure ensemble pour fournir une ténacité (ténacité) et une résistance aux chocs (résistance aux chocs).

Rapport typique :

Phase dure : 70-90 wt % (pourcentage en poids).

Phase liante : 10-30 % en poids .

Exemple : Dans un revêtement WC-Co, le WC représente 80 à 90 % et le Co 10 à 20 %.

3. Méthodes de préparation

Les revêtements en carbure cémenté peuvent être déposés sur la surface du substrat par une variété de procédés, les méthodes courantes incluent :

Projection thermique :

Méthodes :

Pulvérisation d'oxygène-carburant à haute vitesse (HVOF) : utilise une flamme à haute vitesse pour pulvériser de la poudre sur la surface du substrat.

Projection plasma : la poudre est fondue et déposée par un arc plasma.

Projection à la flamme : Projection à l'aide d'une flamme oxyacétylénique.

Caractéristiques:

Épaisseur du revêtement : 0,1-2 mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Résistance de liaison : 50-80 MPa.

Porosité : 1-5%.

Dépôt physique en phase vapeur (PVD) :

Méthodes :

Pulvérisation magnétron.

Évaporation par faisceau d'électrons .

Caractéristiques:

Épaisseur du revêtement : 1-10 μ m .

Convient aux couches minces et aux surfaces lisses.

Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) :

Méthodes :

Une phase dure, telle qu'un revêtement TiC ou TiN , est déposée sur la surface du substrat par réaction chimique.

Caractéristiques:

Épaisseur du revêtement : 5-20 μ m .

Haute uniformité (High Uniformity), mais nécessite une température élevée (High Temperature, 700-1000°C).

Revêtement laser :

Méthodes :

La poudre de carbure cémenté est fondue à l'aide d'un faisceau laser et déposée sur la surface du substrat.

Caractéristiques:

Épaisseur du revêtement : 0,5-3 mm.

Force de liaison élevée, proche de la liaison métallurgique.

4. Caractéristiques de performance

Haute dureté :

Plage de dureté : HV 1000-3000 (dureté Vickers) ou HRC 60-80 (dureté Rockwell).

Exemple : la dureté du revêtement WC-Co peut atteindre HV 1200-1500.

Résistance à l'usure :

Les phases dures (comme le WC) peuvent résister efficacement à l'usure abrasive et à l'usure érosive.

Application : Prolonge la durée de vie des outils de coupe et des moules.

Résistance à la corrosion :

La phase liante (comme le Ni) peut améliorer la résistance à la corrosion du revêtement dans les environnements acides et alcalins.

Exemple : le revêtement Cr₃C₂-NiCr convient aux environnements de corrosion à haute température (corrosion à haute température).

Résistance aux hautes températures :

Il peut maintenir des performances à 600-1000°C et convient aux conditions de température élevée.

Résistance aux chocs :

La phase liante offre une certaine ténacité, mais la résistance globale aux chocs est inférieure à celle

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des matériaux métalliques purs.

5. Exigences relatives au substrat

Matériel:

Matériaux de base courants : acier, fonte, alliage d'aluminium.

Exigences : Le substrat doit avoir une certaine résistance mécanique et thermique.

Préparation de la surface :

Nettoyage : Éliminer la couche d'huile et d'oxyde.

Rugosité : Ra 3,2-6,3 µm (Sablage).

Référence normative : ASME B46.1-2009 (exigences de rugosité de surface).

6. Applications

Outils de coupe industriels :

Exemple : Le revêtement WC-Co est utilisé pour les fraises et les forets afin d'améliorer la résistance à l'usure et la durée de vie.

Moules :

Exemple : les matrices d'emboutissage sont revêtues de Cr₃C₂-NiCr pour éviter l'usure et l'adhérence.

Aérospatial:

Exemple : le revêtement TiC est utilisé pour les aubes de turbine afin d'améliorer la résistance aux hautes températures et à l'usure.

Pétrochimique:

Exemple : les revêtements WC-Ni sont utilisés sur les vannes et les outils de forage pour résister à l'érosion et à la corrosion.

Équipement minier :

Exemple : Le revêtement WC-Co est utilisé dans les marteaux perforateurs pour améliorer la résistance à l'usure abrasive.

7. Méthodes d'essai

Essai de dureté :

Méthode : Dureté Rockwell (HRC, ISO 6508-1:2016), Dureté Vickers (HV, ISO 6507-1:2018).

Exemple : le résultat du test de dureté du revêtement WC-Co est HRC 65 ou HV 1200.

Analyse de la microstructure :

Méthode : Microscope électronique à balayage (MEB).

Observation : Distribution des particules de phase dure, porosité.

Force de liaison :

Méthode : Essai de traction, norme ASTM C633.

Exemple : la force de liaison du revêtement HVOF peut atteindre 70 MPa.

Test de résistance à l'usure :

Méthode : ASTM G65 (Test d'abrasion sur sable sec/roue en caoutchouc).

Résultats : Le taux d'usure du revêtement WC-Co était inférieur à 0,01 mm³ / N · m .

Rugosité de surface :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Méthode : Profilomètre à stilet, ASME B46.1-2009.

Exemple : Rugosité de surface du revêtement Ra 0,8-2,0 μ m .

8. Avantages et inconvénients

Avantages :

La dureté élevée et la résistance à l'usure prolongent considérablement la durée de vie du substrat.

Résistance à la corrosion et aux hautes températures, adaptée aux conditions de travail difficiles.

Personnalisable : répondez à différents besoins en ajustant le rapport entre la phase dure et la phase adhésive.

Inconvénients :

Coût élevé : par exemple, l'équipement de procédé HVOF est coûteux et les prix des matériaux sont élevés.

Fragilité : le revêtement en carbure cimenté présente une faible résistance aux chocs et est sujet aux fissures.

Épaisseur limitée : un revêtement trop épais peut provoquer un pelage.

9. Exemple typique

Revêtement WC-Co :

Composition : WC 88 % en poids , Co 12 % en poids.

Procédé : pulvérisation HVOF.

Performances : Dureté HV 1300, force de liaison 75 MPa, excellente résistance à l'usure.

Application : forêts miniers.

10. Tendances

Revêtements nanostructurés :

Les particules Nano-WC sont utilisées pour améliorer la dureté et la ténacité.

Exemple : Le revêtement Nano WC-Co peut atteindre une dureté de HV 2000.

Revêtements multicouches :

La combinaison de différents carbures cimentés (tels que WC/ TiC) peut améliorer les performances globales.

Exemple : Le revêtement multicouche WC-Cr3C2 est utilisé pour les pièces résistantes à l'usure à haute température.

Procédés écologiques :

Développer des technologies de dépôt à faible consommation d'énergie et à faibles émissions telles que la projection à froid.

Résumé

Le revêtement en carbure cimenté est une technologie de protection de surface haute performance, utilisant du carbure (tel que le WC) comme phase dure et du métal (tel que le Co, le Ni) comme phase de liaison. Ce revêtement est déposé sur la surface du substrat par projection thermique, PVD, CVD et autres procédés. Il présente une dureté, une résistance à l'usure et à la corrosion élevées et est largement utilisé dans les outils industriels, les moules, l'aérospatiale et d'autres secteurs. Ses

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

principaux défis sont le coût, la fragilité et la complexité du procédé, mais grâce aux nanotechnologies et à la conception de structures multicouches, ses performances devraient encore être améliorées à l'avenir.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Technologie de pulvérisation à haute explosion au carbure cémenté (DGS)

1. Définition de la pulvérisation au pistolet à détonation (DGS)

La projection par pistolet à détonation (DGS), également appelée projection par pistolet à détonation, est une technologie de projection thermique qui génère un gaz à haute température et haute pression par des réactions de détonation périodiques, accélère la poudre de carbure cémenté (comme le WC-Co) à une vitesse supersonique (environ 3 500 m/s) et la projette sur la surface du substrat pour former un revêtement très dur et résistant à l'usure. Cette technologie a été inventée par HB Sargent et al. en 1955 et initialement commercialisée par Union Carbide Company sous le nom de « D-Gun ».

2. Principe du procédé de pulvérisation par pistolet à détonation (DGS)

Le DGS utilise une réaction de détonation contrôlée pour fournir de l'énergie. Les étapes spécifiques sont les suivantes :

Réaction de détonation

Dans le pistolet à détonation (D-Gun), un gaz mixte (tel que l'oxygène O_2 et l'acétylène C_2H_2 , dans un rapport de 1 : 1 à 1,5 : 1) est enflammé et une réaction de détonation se produit, générant une onde de choc à haute température (environ 4 000 °C) et à haute pression (environ 2 à 3 MPa).

La vitesse de l'onde de choc peut atteindre 3 500 m/s, formant un flux d'air supersonique.

Accélération et dépôt de poudre

De la poudre de carbure cémenté (granulométrie de 10 à 50 μm) est injectée dans le canon à détonation, accélérée à une vitesse supersonique (environ 800 à 1 200 m/s) par l'onde de choc, et partiellement fondue ou ramollie.

une déformation plastique, refroidissent rapidement et forment un revêtement dense d'une épaisseur généralement de 50 à 300 μm .

Opération périodique

Après chaque détonation, le gaz résiduel dans le canon est purgé avec de l'azote (N_2) pour éviter la combustion spontanée et le retour de flamme.

La fréquence de pulvérisation est de 1 à 10 Hz (1 à 10 détonations par seconde), en fonction de l'épaisseur du revêtement et du matériau.

Prétraitement du substrat

Le substrat doit être rendu rugueux par sablage (Ra 3-5 μm) et nettoyé pour éliminer l'huile et les oxydes afin d'améliorer l'adhérence du revêtement.

3. Caractéristiques de la poudre de carbure cémenté dans la pulvérisation au pistolet à détonation (DGS)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Matériaux couramment utilisés :

WC-Co (teneur en cobalt 6-17 % en poids) : dureté et résistance à l'usure élevées, couramment utilisé dans les revêtements résistants à l'usure.

Cr₃ C₂ - NiCr : Résistant à l'oxydation à haute température, adapté aux environnements à haute température.

Céramiques oxydées (telles que Al₂O₃ - TiO₂) : utilisées pour des exigences particulières de résistance à l'usure ou de résistance à la corrosion.

Besoins en poudre :

Taille des particules : 10-50 μ m , pour assurer l'uniformité de la pulvérisation.

Pureté : > 99 % , teneur en oxygène < 500 ppm, évitant les défauts de revêtement.

Morphologie : sphérique ou presque sphérique, ce qui favorise l'accélération et le dépôt.

4. Application de la pulvérisation par pistolet à détonation (DGS) dans le domaine du carbure cémenté

La technologie DGS est largement utilisée dans les scénarios nécessitant une résistance élevée à l'usure et à la corrosion en raison de sa force de liaison élevée et de la faible porosité du revêtement :

Aérospatial:

Pulvérisation de pièces de moteurs d'avion (telles que des aubes de turbine, des aubes de compresseur) pour améliorer la résistance à l'usure et la résistance aux températures élevées.

Équipement industriel :

Revêtement de surface des outils de coupe, des matrices, des vannes et des corps de pompe pour prolonger la durée de vie.

Industrie de l'énergie :

Revêtements pour équipements de forage pétrolier et gazier (tels que les forets) pour résister à l'érosion et à l'usure.

Exemple spécifique : la pulvérisation d'un revêtement WC-12Co sur les aubes de turbine de moteur d'avion peut atteindre une dureté de HV 1100-1300 et améliorer la résistance à l'usure de 5 à 8 fois.

5. Paramètres du processus de pulvérisation à haute explosion de carbure cémenté (pulvérisation par pistolet à détonation, (DGS)

Gaz de détonation : O₂ + C₂H₂ (rapport 1:1-1,5:1), ou ajouter une petite quantité de N₂ (5 -10 %) pour ajuster la température.

Fréquence de pulvérisation : 1 à 10 Hz, pour contrôler l'épaisseur du revêtement.

Distance de pulvérisation : 150-200 mm, éviter de surchauffer le support.

Débit d'alimentation en poudre : 20-40 g/min, pour assurer un revêtement uniforme.

Température du substrat : contrôlée à <150°C pour éviter la zone affectée thermiquement (ZAT).

Gaz de purge : N₂ , purger pendant 2 à 3 secondes après chaque détonation.

6. Caractéristiques de la pulvérisation par pistolet à détonation (DGS)

Haute température et haute pression : la température de détonation est d'environ 4 000 °C et la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

vitesse de l'onde de choc est de 3 500 m/s, ce qui est bien supérieur aux autres technologies de projection thermique.

Performances du revêtement :

Dureté élevée : dureté du revêtement WC-Co HV 1100-1400.

Force de liaison : 70-100 MPa, liaison principalement mécanique, liaison métallurgique partielle.

Très faible porosité : <1%, revêtement dense.

Rugosité de surface : Ra 2-4 μ m, moins de traitement ultérieur requis.

Faible apport de chaleur : température du substrat < 150 °C, pas de zone affectée thermiquement (ZAT), pas de traitement thermique ultérieur (PWHT) requis.

Avantages et inconvénients de la pulvérisation à haute explosion au carbure cimenté (pulvérisation au pistolet à détonation, (DGS)

Avantages :

Revêtement de haute qualité : porosité <1%, force de liaison élevée, excellente résistance à l'usure et à la corrosion.

Faible impact thermique : pas de déformation thermique du substrat, adapté aux pièces de précision.

Forte applicabilité : peut pulvériser une variété de carbures cimentés et de matériaux céramiques (tels que WC-Co, Al₂O₃).

Moins de post-traitement : faible rugosité de surface, réduisant les coûts de traitement ultérieurs.

Inconvénients :

Équipement complexe : La conception du pistolet de sablage est complexe et le coût est élevé (environ 2 à 3 millions de yuans).

Risques opérationnels : Implique une réaction de détonation, nécessitant des mesures de sécurité strictes (telles que l'anti-retour de flamme et la purge à l'azote).

Faible efficacité : fonctionnement périodique (1-10 Hz), vitesse de pulvérisation lente (environ 0,1-0,3 m²/h).

Limitation de la poudre : une poudre à haute résistance (comme le WC-Co) est nécessaire, sinon elle risque de se casser.

8. Comparaison entre la projection par pistolet à détonation (DGS) et d'autres technologies de projection thermique

Comparaison avec l'APS (spray plasma) :

DGS : Porosité plus faible (<1% contre 2-5%), résistance de liaison plus élevée (70-100 MPa contre 30-70 MPa), mais efficacité plus faible.

APS : Température plus élevée (15 000 °C), adaptée à une gamme plus large de matériaux, mais plus d'oxydation.

Comparé au HVOF (High Velocity Oxygen Fuel Spray) :

DGS : revêtement plus dense, dureté plus élevée (HV 1100-1400 vs 800-1200), mais équipement plus complexe.

HVOF : Vitesse de pulvérisation plus rapide (0,5-1 m²/h), coût moindre, moins d'oxydation.

Comparé au VPS (projection plasma sous vide) :

DGS : fonctionne dans l'atmosphère, à faible coût, mais peut présenter des traces d'oxydation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

VPS : Pas d'oxydation, porosité plus faible, mais coût d'équipement élevé (environ 5 millions de yuans).

Résumer

La technologie de projection à haute explosion (DGS) de carbure cimenté utilise une réaction de détonation pour projeter de la poudre de carbure cimenté sur le substrat afin de former un revêtement de haute dureté et de faible porosité, largement utilisé dans l'aérospatiale, les équipements industriels et d'autres secteurs. Ses avantages sont une qualité de revêtement élevée et un faible impact thermique, mais l'équipement est complexe et le rendement est faible. L'optimisation du procédé (par exemple, l'ajustement de la fréquence de détonation et de la granulométrie de la poudre) peut encore améliorer les performances.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

de projection plasma au carbure cémenté (APS , projection plasma atmosphérique)

1. Définition de la pulvérisation plasma atmosphérique (APS)

La projection plasma de carbure cémenté (APS , projection plasma atmosphérique) est une technologie de projection thermique qui utilise une flamme plasma pour chauffer de la poudre de carbure cémenté (comme le WC-Co, le WC-Ni) jusqu'à l'état fondu ou semi-fondu, puis la projette à grande vitesse sur la surface du substrat pour former un revêtement dense de carbure cémenté. Ce procédé est réalisé en milieu atmosphérique, d'où son nom de « projection plasma atmosphérique ».

2. Principe de la projection plasma atmosphérique (APS)

Le procédé APS repose sur les caractéristiques de haute température et de haute énergie du plasma. Les principales étapes sont les suivantes :

Génération de plasma

À l'aide d'un pistolet de projection plasma, un gaz inerte (tel que l'argon Ar) ou un gaz mixte (tel que Ar+H₂) est introduit, et un arc haute fréquence (tension 50-100 V, courant 500-1000 A) est utilisé pour ioniser le gaz afin de former un plasma à haute température (la température peut atteindre 10 000-15 000 °C).

Chauffage et accélération de la poudre

La poudre de carbure cémenté (taille des particules 10-50 μ m) est introduite dans la flamme plasma via un alimentateur de poudre, rapidement chauffée jusqu'à un état fondu ou semi-fondu et accélérée à 300-600 m/s.

Formation de revêtement

Les particules de poudre fondue impactent la surface du substrat, refroidissent rapidement et se solidifient pour former un revêtement « éclaboussé » (éclaboussures), qui s'empilent pour former un revêtement dense d'une épaisseur généralement de 50 à 500 μ m .

Contrôle de l'atmosphère

L'APS fonctionne en milieu atmosphérique et présente un risque d'oxydation. Un gaz protecteur (tel que l'argon) est souvent utilisé pour protéger partiellement la sortie du pistolet afin de réduire l'oxydation du revêtement.

3. Caractéristiques de la poudre de projection plasma au carbure cémenté (APS , projection plasma atmosphérique)

Matériaux couramment utilisés :

WC-Co (teneur en cobalt 6-12 % en poids) : dureté et résistance à l'usure élevées, souvent utilisé dans les revêtements résistants à l'usure.

WC-Ni : Meilleure résistance à la corrosion, adapté aux environnements acides.

Cr₃ C₂ - NiCr : Résistant à l'oxydation à haute température, adapté aux environnements à haute

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

température.

Besoins en poudre :

Taille des particules : 10-50 μ m , assurant une bonne fluidité et une fusion uniforme.

Pureté : > 99 % , impuretés (telles que O₂) < 500 ppm, évitant les défauts de revêtement.

Morphologie : sphérique ou presque sphérique, ce qui favorise l'uniformité de la pulvérisation.

4. Application de la projection plasma au carbure cémenté (APS , Atmospheric Plasma Spraying) dans le domaine du carbure cémenté

L'APS est largement utilisé pour la préparation de revêtements en carbure cémenté sur des substrats (acier, acier inoxydable, aluminium, etc.) afin d'améliorer la résistance à l'usure, à la corrosion et aux températures élevées. Ses principales applications sont :

Pièces industrielles :

Le revêtement de surface des outils de coupe et des moules peut prolonger leur durée de vie.

Les revêtements pour vannes et corps de pompe améliorent la résistance à l'usure et à la corrosion.

Aérospatial:

Revêtement d'aube de turbine, résistant à l'usure à haute température.

Industrie de l'énergie :

Revêtements pour tuyaux de chaudières et équipements de forage pour résister à l'érosion et à l'oxydation à haute température.

Exemple spécifique : la pulvérisation d'un revêtement WC-12Co sur la surface d'un trépan à huile peut atteindre une dureté de HRC 60-65 et améliorer la résistance à l'usure de 3 à 5 fois.

Paramètres du procédé de projection plasma au carbure cémenté (APS , projection plasma atmosphérique)

Gaz plasma : Ar (gaz principal, 30-50 L/min) + H₂ (gaz auxiliaire , 5-10 L/min).

Puissance : 30-50 kW (selon le modèle de pistolet).

Distance de pulvérisation : 80-150 mm, affecte la densité et la force de liaison du revêtement.

d'alimentation en poudre : 30-60 g/min, pour assurer un revêtement uniforme.

Prétraitement du support : sablage rugueux (Ra 3-5 μ m) pour améliorer la force de liaison.

Refroidissement : Le substrat nécessite un refroidissement par air forcé ou par eau, et la température doit être contrôlée à <200°C pour éviter le stress thermique.

6. Caractéristiques de la projection plasma au carbure cémenté (APS , Atmospheric Plasma Spraying)

Capacité à haute température : La température du plasma est extrêmement élevée (10 000-15 000 °C), capable de faire fondre des carbures cémentés à point de fusion élevé (tels que le WC, point de fusion 2870 °C).

Performances du revêtement :

Dureté élevée : la dureté du revêtement WC-Co peut atteindre HV 900-1200.

Force de liaison : 30-70 MPa (selon le substrat et le procédé).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Porosité : 2-5%, dense mais présente encore des micropores.

Environnement d'exploitation : réalisé en atmosphère, avec un équipement simple, adapté aux sites industriels.

7. Avantages et inconvénients de la projection plasma au carbure cémenté (APS , Atmospheric Plasma Spraying)

Avantages :

Large applicabilité : il peut pulvériser une variété de matériaux en carbure cémenté (tels que WC-Co, Cr₃C₂- NiCr) pour s'adapter à différents substrats.

Haute efficacité : vitesse de pulvérisation rapide (jusqu'à 0,5-1 m²/h), adaptée au revêtement de grandes surfaces.

Le revêtement présente d'excellentes performances : dureté élevée, bonne résistance à l'usure et améliore considérablement la durée de vie des pièces.

Le coût de l'équipement est modéré : l'équipement APS (environ 500 000 à 1 000 000 de yuans) est moins cher que le HVOF (pulvérisation de carburant à oxygène à haute vitesse).

Inconvénients :

Risque d'oxydation : Lors d'un fonctionnement en atmosphère, le revêtement peut s'oxyder (par exemple, le WC se décompose en W₂C et génère de l'oxyde WO₃), affectant ainsi les performances.

Porosité plus élevée : une porosité de 2 à 5 % peut réduire la résistance à la corrosion et nécessiter un post-traitement (comme un scellement).

Influence thermique : un flux de flamme à haute température peut provoquer une déformation thermique du substrat et le refroidissement doit être strictement contrôlé.

Contrainte résiduelle : les différences de coefficients de dilatation thermique entre le revêtement et le substrat peuvent entraîner des concentrations de contraintes qui affectent la liaison.

8. Comparaison entre la projection plasma au carbure cémenté (APS , Atmospheric Plasma Spraying) et d'autres technologies de projection thermique

Comparé au HVOF (High Velocity Oxygen Fuel Spray) :

APS : Température plus élevée (15 000 °C), adaptée aux matériaux à point de fusion élevé, mais plus d'oxydation et une porosité plus élevée (2 à 5 %).

HVOF : température plus basse (3000°C), vitesse plus élevée (>1000 m/s), moins d'oxydation, porosité plus faible (<1%), mais dureté légèrement inférieure pour les revêtements WC-Co (HV 800-1000).

Comparaison avec la pulvérisation plasma sous vide (VPS) :

APS : Dans l'atmosphère, le coût est faible, mais les problèmes d'oxydation et de porosité sont importants.

VPS : Sous vide, la qualité du revêtement est supérieure (porosité < 1 %, pas d'oxydation), mais l'équipement est complexe et le coût est élevé (2 à 5 millions de yuans).

La projection plasma de carbure (APS) utilise un plasma haute température pour projeter de la poudre de carbure sur la surface du substrat afin de former un revêtement très dur et résistant à l'usure, largement utilisé dans les pièces industrielles, l'aérospatiale et d'autres secteurs. Ses

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

avantages sont une large application et une grande efficacité, mais il convient de prêter attention aux problèmes d'oxydation et de porosité. L'optimisation du procédé (par exemple, l'ajustement de la distance de projection et l'ajout de gaz protecteur) peut améliorer encore la qualité du revêtement.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Technologie de pulvérisation d'oxygène-carburant à grande vitesse pour le carbure cémenté (Pulvérisation de carburant à l'oxygène à grande vitesse , HVOF)

1. Définition de la pulvérisation d'oxygène combustible à haute vitesse (HVOF) au carbure cémenté
La projection d'oxygène combustible (HVOF) de carbure cémenté est une technologie de projection thermique qui génère un flux d'air à haute température et haute pression grâce à la combustion à grande vitesse du combustible et de l'oxygène. Elle accélère la poudre de carbure cémenté (comme le WC-Co, le Cr₃C₂ - NiCr) à une vitesse supersonique (environ 500 à 1 000 m/s), la projette sur la surface du substrat et forme un revêtement résistant à l'usure de haute dureté et de faible porosité. Développée par Browning dans les années 1980, cette technologie est largement utilisée en raison de ses excellentes performances de revêtement.

2. Principe du procédé de pulvérisation d'oxygène combustible à haute vitesse (HVOF) au carbure cémenté

La technologie HVOF utilise un flux d'air à grande vitesse généré par la combustion du carburant. Les principales étapes sont les suivantes :

Accélération de la combustion et du flux d'air

Dans la chambre de combustion du pistolet, le carburant (tel que le kérosène, le propane ou l'hydrogène) est mélangé à de l'oxygène et enflammé à une température de combustion d'environ 2800-3200°C.

Le gaz de combustion à haute pression est accéléré à une vitesse supersonique (500-1000 m/s) à travers la buse Laval, formant un flux de flamme à grande vitesse.

Chauffage et pulvérisation de poudre

La poudre de carbure cémenté (granulométrie 10-45 μ m) est injectée dans la flamme via un alimentateur de poudre, partiellement fondue ou ramollie (température inférieure au point de fusion, environ 1000-1500°C), et accélérée à une vitesse supersonique.

Les particules de poudre impactent le substrat avec une énergie cinétique élevée, subissent une déformation plastique, refroidissent rapidement et se déposent pour former un revêtement dense d'une épaisseur typiquement de 50 à 400 μ m .

Contrôle de l'atmosphère

La combustion s'effectue dans un environnement riche en oxygène avec une vitesse de flamme élevée, ce qui réduit l'entraînement d'air et réduit le degré d'oxydation du revêtement.

Prétraitement du substrat

Le substrat doit être sablé pour le rendre rugueux (Ra 3-5 μ m) et nettoyé pour éliminer l'huile et les oxydes et améliorer la force de liaison.

3. Caractéristiques de la poudre de carbure cémenté pour pulvérisation d'oxygène à haute vitesse (HVOF)

Matériaux couramment utilisés :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC-Co (teneur en cobalt 6-17 % en poids) : dureté et résistance à l'usure élevées, couramment utilisé dans les revêtements résistants à l'usure.

Cr₃ C₂ - NiCr : Résistant à l'oxydation et à la corrosion à haute température, adapté aux environnements à haute température.

NiCrBSi : Alliage auto-fondant, résistant à l'usure et à la corrosion.

Besoins en poudre :

Taille des particules : 10-45 μm, pour assurer l'uniformité de la pulvérisation.

Pureté : > 99 %, teneur en oxygène < 500 ppm, évitant les défauts de revêtement.

Morphologie : sphérique ou presque sphérique, ce qui favorise l'accélération et le dépôt.

4. Caractéristiques de la pulvérisation d'oxygène combustible à haute vitesse (HVOF) au carbure cimenté

Haute vitesse et basse température :

La vitesse de la flamme est aussi élevée que 500-1000 m/s, l'énergie cinétique des particules est élevée, mais la température est relativement basse (1000-1500°C), ce qui évite la décomposition des carbures cimentés (comme le WC).

Propriétés du revêtement :

Dureté élevée : dureté du revêtement WC-Co HV 800-1200.

Force de liaison : 50-80 MPa, liaison principalement mécanique, liaison métallurgique partielle.

La porosité est extrêmement faible : <1-2%, le revêtement est dense et présente une forte résistance à la corrosion.

Rugosité de surface : Ra 3-6 μm, peut être optimisée par polissage.

Faible oxydation :

Le flux de flamme supersonique réduit l'entraînement d'air et le revêtement a une faible teneur en oxyde (comme une moindre décomposition du WC en W₂C ou WO₃).

Faible influence du substrat :

La température du substrat est < 200 °C, la zone affectée par la chaleur (ZAT) est petite et aucun traitement thermique ultérieur n'est requis.

5. Application de carbure cimenté par pulvérisation d'oxygène combustible à haute vitesse (HVOF)

Le HVOF est largement utilisé dans le domaine du carbure cimenté, principalement pour améliorer la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la résistance aux hautes températures du substrat :

Aérospatial:

Revêtements pour trains d'atterrissage et aubes de turbine d'avion pour améliorer la résistance à l'usure et à la corrosion.

Équipement industriel :

Revêtement de surface des outils de coupe, des matrices, des vannes et des corps de pompe pour prolonger la durée de vie.

Industrie de l'énergie :

Équipements de forage pétrolier et gazier (tels que les forets) et revêtements de tuyaux de chaudière pour résister à l'érosion et à l'oxydation à haute température.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fabrication du papier et impression :

Le revêtement de surface du rouleau (tel que WC-Co) améliore la résistance à l'usure et la qualité de la surface.

Exemple concret :

La pulvérisation du revêtement WC-12Co sur les forets à huile a une dureté de HV 1000-1200 et augmente la résistance à l'usure de 4 à 6 fois.

Cr₃C₂- NiCr pulvérisé sur le train d'atterrissage de l'avion présente une résistance à la température allant jusqu'à 800°C et une excellente résistance à la corrosion.

6. Avantages et inconvénients de la pulvérisation d'oxygène combustible à haute vitesse (HVOF) au carbure cimenté

Avantages

Revêtement de haute qualité : porosité <1-2%, force de liaison élevée, excellente résistance à l'usure et à la corrosion.

Faible oxydation : vitesse de flamme élevée, réduction de l'oxydation, adapté au carbure cimenté (tel que WC-Co).

Faible impact thermique : faible température du substrat, adapté aux pièces de précision.

Haute efficacité : vitesse de pulvérisation 0,5-1 m²/h, adaptée à la production industrielle.

Inconvénients

Coût élevé de l'équipement : l'équipement HVOF coûte environ 1 à 2 millions de RMB et est complexe à entretenir.

Exigences élevées en matière de poudre : une poudre à haute résistance (comme le WC-Co) est nécessaire, sinon elle risque de se casser.

Bruit fort : les flammes supersoniques produisent un bruit à décibels élevés (> 120 dB), nécessitant des installations d'insonorisation.

Limite d'épaisseur : Lorsque l'épaisseur du revêtement est > 400 μ m , il est facile de le fissurer et doit être pulvérisé en couches.

7. Comparaison de la pulvérisation d'oxygène combustible à haute vitesse (HVOF) au carbure cimenté et d'autres technologies de projection thermique

Comparaison avec l'APS (pulvérisation plasma)

HVOF : porosité plus faible (<1-2% contre 2-5%), moins d'oxydation et force de liaison plus élevée (50-80 MPa contre 30-70 MPa).

APS : Température plus élevée (15 000 °C), adaptée à une gamme plus large de matériaux, mais plus d'oxydation.

Comparaison avec la pulvérisation d'explosifs puissants (DGS)

HVOF : Efficacité supérieure (0,5-1 m²/h vs 0,1-0,3 m²/h) et coût d'équipement inférieur.

DGS : Dureté du revêtement plus élevée (HV 1100-1400 contre 800-1200), mais plus compliqué à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

utiliser.

La technologie HVOF (projection d'oxygène combustible à haute vitesse) au carbure cémenté pulvérise de la poudre de carbure cémenté sur le substrat grâce à un flux de flamme supersonique. Ce procédé forme un revêtement de haute dureté et de faible porosité, offrant une qualité de revêtement élevée, une faible oxydation et un faible impact thermique. Il est largement utilisé dans les secteurs de l'aérospatiale, des équipements industriels et de l'énergie. L'optimisation du procédé (par exemple, l'ajustement du rapport carburant/combustible et de la distance de pulvérisation) peut améliorer encore les performances.

appendice:

Projection plasma sous vide au carbure cémenté (VPS , projection plasma sous vide)

1. Définition de la projection plasma sous vide au carbure cémenté (VPS)

La projection plasma sous vide (VPS) de carbure cémenté est une technologie de projection thermique qui utilise une flamme plasma pour chauffer de la poudre de carbure cémenté (comme le WC-Co, le Cr₃C₂ - NiCr) jusqu'à l'état fondu ou semi-fondu sous vide ou basse pression, puis la projette sur la surface du substrat pour former un revêtement résistant à l'usure, non oxydé et de haute dureté, à faible porosité. Développée dans les années 1970, la technologie VPS est largement utilisée dans les secteurs à forte demande grâce à la qualité exceptionnelle de son revêtement.

2. Principe du procédé de projection plasma sous vide (VPS) au carbure cémenté

La technologie VPS repose sur les caractéristiques de l'environnement plasma à haute température et sous vide. Les principales étapes sont les suivantes :

Environnement sous vide :

La pulvérisation est réalisée dans une chambre à vide avec une pression contrôlée à 50-200 Pa (0,05-0,2 mbar), et l'air est évacué par une pompe à vide (pompe mécanique + pompe à diffusion) pour réduire l'oxygène et l'humidité.

Génération de plasma :

À l'aide d'un pistolet de projection plasma, un gaz inerte (tel que l'argon Ar) ou un gaz mixte (tel que Ar+H₂) est introduit, et le gaz est ionisé par un arc haute fréquence (tension 50-100 V, courant 600-1200 A) pour former un plasma haute température (température 10 000-15 000 °C).

Chauffage et accélération de la poudre :

La poudre de carbure cémenté (taille des particules 10-50 μ m) est injectée dans la flamme plasma via un alimentateur de poudre, rapidement chauffée jusqu'à un état fondu ou semi-fondu et accélérée à 300-600 m/s.

Formation du revêtement :

Les particules fondues frappent la surface du substrat, refroidissent rapidement et se solidifient pour former un revêtement « éclaboussé » (éclaboussures), qui s'empile pour former un revêtement dense d'une épaisseur généralement de 50 à 500 μ m .

Contrôle de l'atmosphère :

L'environnement sous vide (<200 Pa) est presque sans oxygène, ce qui empêche le revêtement de s'oxyder (comme la décomposition du WC en W₂C ou WO₃) .

3. Caractéristiques de la poudre d'or en carbure cémenté obtenue par projection plasma sous vide (VPS)

Matériaux couramment utilisés :

WC-Co (teneur en cobalt 6-12 % en poids) : dureté et résistance à l'usure élevées, couramment utilisé dans les revêtements résistants à l'usure.

Cr₃ C₂ - NiCr : Résistant à l'oxydation et à la corrosion à haute température, adapté aux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

environnements à haute température.

TiC -Ni : Dureté élevée, adapté aux exigences particulières de résistance à l'usure.

Besoins en poudre :

Taille des particules : 10-50 μm , pour assurer l'uniformité de la pulvérisation.

Pureté : > 99,5 % , teneur en oxygène < 300 ppm, évitant les défauts de revêtement.

Morphologie : Sphérique ou presque sphérique, ce qui favorise l'accélération et le dépôt.

4. Caractéristiques de la projection plasma sous vide au carbure cémenté (VPS)

Pas d'oxydation :

L'environnement sous vide (<200 Pa) élimine l'oxydation et le revêtement est exempt d'oxydes (tels que WO_3) , conservant les propriétés d'origine du carbure cémenté.

Performances du revêtement :

Dureté élevée : dureté du revêtement WC-Co HV 1000-1300.

Force de liaison : 60-90 MPa, liaison métallurgique partielle, liaison plus forte.

La porosité est extrêmement faible : < 0,5-1 % , le revêtement est dense et présente une excellente résistance à la corrosion.

Rugosité de surface : Ra 2-4 μm , moins de traitement ultérieur requis.

Capacité à haute température :

La température du plasma est de 10 000 à 15 000 $^{\circ}\text{C}$, ce qui permet de faire fondre des carbures cémentés à point de fusion élevé (tels que le WC, point de fusion 2870 $^{\circ}\text{C}$).

Faible influence du substrat :

La température du substrat peut être contrôlée à < 200 $^{\circ}\text{C}$ et la zone affectée par la chaleur (HAZ) est petite, ce qui convient aux pièces de précision.

Processus complexe :

Une chambre à vide et un système de vide sont nécessaires, ce qui rend l'opération compliquée et le coût élevé.

5. Application de la projection plasma sous vide (VPS) pour le carbure cémenté

L'application du VPS dans le domaine du carbure cémenté est principalement concentrée dans des scénarios de haute performance et de haute fiabilité :

Aérospatial:

Revêtements d'aubes de turbine et de chambres de combustion, résistants à l'usure à haute température et à l'oxydation.

Revêtement pour composants d'engins spatiaux, résistant à la corrosion dans les environnements à haute température et sous vide.

Dispositifs médicaux :

Revêtement de surface des articulations artificielles (telles que les articulations de la hanche) pour améliorer la résistance à l'usure et la biocompatibilité.

Industrie de l'énergie :

Revêtements pour équipements nucléaires et turbines à gaz pour résister à la corrosion et à l'usure à haute température.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Industrie haut de gamme :

Moules de précision et revêtements d'outils de coupe pour prolonger la durée de vie.

Exemple concret :

Le revêtement par pulvérisation WC-12Co sur les aubes de turbine d'aviation a une dureté de HV 1100-1300, la résistance à l'usure est améliorée de 5 à 10 fois et il n'y a aucun défaut d'oxyde.

Le revêtement Cr₃C₂- NiCr est pulvérisé sur les vannes nucléaires, qui peuvent résister à des températures de 900°C et présentent une excellente résistance à la corrosion.

6. Avantages et inconvénients de la projection plasma sous vide au carbure cémenté (VPS)

Avantages :

La qualité du revêtement est extrêmement élevée : porosité < 0,5-1 %, pas d'oxydation, résistance optimale à l'usure et à la corrosion.

Résistance de liaison élevée : 60-90 MPa, liaison métallurgique partielle, le revêtement n'est pas facile à décoller.

Applicable aux scénarios à forte demande : adapté aux domaines de haute performance tels que l'aérospatiale, le médical, etc.

Faible impact thermique : faible température du substrat, adapté aux pièces de précision.

Inconvénients :

Coût élevé de l'équipement : le système VPS (y compris la chambre à vide) coûte environ 3 à 5 millions de RMB et est complexe à entretenir.

Faible efficacité : l'aspiration est nécessaire (chaque opération prend 30 à 60 minutes), la vitesse de pulvérisation est d'environ 0,3 à 0,5 m²/h.

Opération complexe : le degré de vide et l'atmosphère doivent être strictement contrôlés et les compétences techniques de l'opérateur doivent être élevées.

Taille limitée du substrat : en raison de la taille de la chambre à vide, la pulvérisation de grandes pièces est difficile.

7. Comparaison entre la projection plasma sous vide au carbure cémenté (VPS) et d'autres technologies de projection thermique

Comparaison avec l'APS (spray plasma) :

VPS : Pas d'oxydation, porosité plus faible (< 0,5-1 % contre 2-5 %), force de liaison plus élevée (60-90 MPa contre 30-70 MPa).

APS : Fonctionne dans l'atmosphère, a un faible coût, mais est plus oxydant.

Comparé au HVOF (High Velocity Oxygen Fuel Spray) :

VPS : Le revêtement est plus dense et sans oxydation, mais le coût est élevé et l'efficacité est faible.

HVOF : La porosité est légèrement plus élevée (<1-2%), mais le coût de l'équipement est faible (1-2 millions de yuans) et l'efficacité est élevée.

Comparé au DGS (pulvérisation d'explosifs puissants) :

VPS : Pas d'oxydation, adapté aux scénarios de demande plus élevée, mais efficacité moindre.

DGS : porosité similaire (<1%), mais peut présenter des traces d'oxydation et un coût d'équipement légèrement inférieur (2 à 3 millions de yuans).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La technologie de projection plasma sous vide (VPS) de carbure cémenté utilise le plasma pour projeter de la poudre de carbure cémenté sous vide afin de former un revêtement de haute dureté, non oxydé et à faible porosité. Elle se caractérise par une qualité de revêtement exceptionnelle et un faible impact thermique. Elle est largement utilisée dans les secteurs de l'aérospatiale, de la médecine et de l'industrie haut de gamme. Cependant, son coût d'équipement élevé et son faible rendement sont des atouts pour les applications exigeantes. L'optimisation du procédé (par exemple, l'ajustement du degré de vide et de la distance de projection) peut améliorer encore les performances.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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

Tableau comparatif des technologies de projection de carbure cémenté

Nom de la technologie	Projection plasma (APS)	Pulvérisation d'explosifs puissants (DGS)	Pulvérisation d'oxygène-carburant à haute vitesse (HVOF)	Projection plasma sous vide (VPS)
définition	est pulvérisé avec une flamme plasma dans l'atmosphère pour former un revêtement résistant à l'usure.	L'alliage dur est pulvérisé à une vitesse supersonique par réaction de détonation pour former un revêtement de haute dureté.	Le revêtement à faible porosité est formé par pulvérisation supersonique de carbure cémenté par combustion de carburant et d'oxygène.	est pulvérisé avec une flamme plasma dans un environnement sous vide pour former un revêtement sans oxydation.
Principe du processus	Ionisation Ar ou Ar + H ₂ , température 10 000-15 000°C. La poudre (10-50 μ m) est accélérée à 300-600 m/s. Fonctionnement atmosphérique, blindage Ar .	Détonation O ₂ +C ₂ H ₂ , température 4000°C, onde de choc 3500 m/s. La poudre (10-50 μ m) est accélérée à 800-1200 m/s. Fréquence 1-10 Hz, purge N ₂ .	Combustion O ₂ + kérosène/propane, température 2800-3200°C. La poudre (10-45 μ m) est accélérée à 500-1000 m/s. Buse Laval.	Vide (50-200 Pa), ionisation Ar ou Ar+H ₂ , température 10 000-15 000°C. La poudre (10-50 μ m) est accélérée à 300-600 m/s. Environnement anaérobie.
Caractéristiques	Forte capacité à haute température, dureté HV 900-1200. Porosité 2-5%, force de liaison 30-70 MPa. Risque d'oxydation.	Haute température et haute pression, dureté HV 1100-1400. Porosité <1%, force de liaison 70-100 MPa. Faible apport de chaleur.	Haute vitesse et faible chaleur, dureté HV 800-1200. Porosité <1-2%, force de liaison 50-80 MPa. Faible oxydation.	Aucune oxydation, dureté HV 1000-1300. Porosité < 0,5-1 %, force de liaison 60-90 MPa. Capacité à haute température.
application	Outils de coupe, vannes, corps de pompe. Aubes de turbine, tuyaux de chaudière. Exemple : Foret WC-12Co, résistance à l'usure augmentée de 3 à 5 fois.	Aubes de turbine, aubes de compresseur. Outils de coupe, forets pour pétrole et gaz. Exemple : WC-12Co pour les aubes de turbine, résistance à l'usure augmentée de 5 à 8 fois.	Train d'atterrissage, pales de turbine. Outils de coupe, équipements de perçage, rouleaux. Exemple : Foret WC-12Co, résistance à l'usure augmentée de 4 à 6 fois.	Aubes de turbine, composants de vaisseaux spatiaux. Articulations médicales, équipements nucléaires. Exemple : WC-12Co pour les aubes de turbine, résistance à l'usure augmentée de 5 à 10 fois.
Avantages et inconvénients	Avantages : large applicabilité, haute efficacité (0,5-1 m ² /h), coût modéré (500 000-1 million de yuans). Inconvénients : forte oxydation, porosité nécessitant un post-	Avantages : haute qualité de revêtement, faible impact thermique, moins de post-traitement. Inconvénients : équipement complexe (2-3 millions de yuans), faible efficacité (0,1-0,3 m ² /h), risque élevé.	Avantages : haute qualité de revêtement, faible oxydation, haute efficacité (0,5-1 m ² /h). Inconvénients : coût élevé (1 à 2 millions de yuans), bruit élevé et épaisseur limitée.	Avantages : Qualité de revêtement extrêmement élevée, pas d'oxydation, adapté aux exigences élevées. Inconvénients : coût élevé (3 à 5 millions de yuans), faible efficacité (0,3 à 0,5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	traitement, thermiques.	effets			m ² /h), taille limitée.
--	----------------------------	--------	--	--	-------------------------------------

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

en.com

www.ch

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

1

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

appendice:

Ingénierie des interfaces en carbure

1. La connotation et l'importance de l'ingénierie des interfaces en carbure cimenté

Le carbure cimenté (WC-Co), dont la phase dure est le carbure de tungstène (WC) et la phase liante le cobalt (Co), est largement utilisé dans les domaines de haute performance tels que les buses d'aviation, les outils de coupe et les électrodes de cellules électrolytiques, en raison de son excellente dureté (HV1000–1800), de sa résistance à l'usure et de sa stabilité à haute température. Cependant, ses performances dépendent non seulement du matériau du substrat, mais aussi des caractéristiques de l'interface (telles que l'interface WC/Co, l'interface revêtement/substrat). L'interface est une zone microscopique entre différentes phases (telles que WC et Co, revêtement et substrat) à l'intérieur ou à la surface du matériau. Sa composition chimique, sa microstructure et son comportement mécanique influencent directement les performances globales du matériau. Dans des conditions extrêmes, telles que l'érosion à haute température (1 000 à 1 600 °C) des buses d'aviation ou les environnements hautement corrosifs (pH 1 à 14) des cellules électrolytiques, les défauts d'interface (tels que les pores, la concentration de contraintes et une force de liaison insuffisante) peuvent entraîner une usure accrue, un décollement du revêtement ou une diminution de l'efficacité catalytique.

L'ingénierie des interfaces en carbure cimenté utilise des méthodes physiques, chimiques ou mécaniques pour contrôler précisément la microstructure, la liaison chimique et les propriétés mécaniques de l'interface afin d'optimiser la fonctionnalité et la durabilité du matériau. Cette technologie vise à créer une interface solide et stable, à améliorer la synergie entre le substrat et le revêtement, et entre les différentes phases, améliorant ainsi les performances du carbure cimenté dans des environnements complexes. Par exemple, dans les tuyères aéronautiques, l'ingénierie des interfaces peut améliorer l'adhérence du revêtement et prolonger la durée de vie des tuyères de 30 à 50 % ; dans les électrodes d'électrolyseur, l'optimisation de l'activité catalytique de l'interface peut augmenter le rendement de dégagement d'hydrogène de 10 à 20 %. L'ingénierie des interfaces est non seulement essentielle aux avancées technologiques du carbure cimenté, mais aussi un moteur important du progrès technologique dans les secteurs de l'aviation, de l'énergie et de la fabrication.

2. L'objectif principal de l'ingénierie d'interface

L'ingénierie des interfaces vise à résoudre les problèmes d'interface du carbure cimenté dans des applications pratiques. Ses principaux objectifs sont les suivants :

Améliore la résistance de liaison de l'interface : améliore l'adhérence du revêtement/substrat ou de l'interface WC/Co (par exemple > 50 N), empêche le pelage ou la fissuration et répond aux exigences d'érosion à haute pression des buses d'aviation.

Optimisation de la répartition des contraintes

$-6 / ^\circ\text{C}$ par rapport à Al_2O_3 $8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) peut être atténué par la conception du gradient d'interface ou

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'induction de contraintes de compression.

Améliorer la résistance à la corrosion

Construisez une interface dense pour bloquer les milieux corrosifs (tels que l'acide sulfurique et l'hydroxyde de potassium dans la cellule électrolytique) et réduisez le taux de corrosion de 50 à 90 %.

Améliorer l'activité catalytique

Dans les électrodes d'électrolyseur, les sites actifs sont augmentés par des nanostructures interfaciales, réduisant la surtension pour l'évolution de l'hydrogène/oxygène (50–200 mV).

Prolonger la durée de vie

L'optimisation complète des performances de l'interface peut prolonger la durée de vie des pièces de 20 à 50 %, par exemple en augmentant la durée de vie de la buse d'aviation de 5 000 heures à 8 000 heures.

3. Principales méthodes techniques d'ingénierie des interfaces en carbure cémenté

La technologie d'ingénierie des interfaces en carbure cémenté couvre trois catégories : la conception de la structure de l'interface, l'optimisation de l'interface du revêtement et la modification de l'interface du substrat. Voici une analyse approfondie des principales méthodes, du point de vue du principe, du procédé et de l'application.

3.1 Conception de la structure de l'interface

En régulant la microstructure de l'interface WC/Co, l'effet synergique des phases internes du carbure cémenté est optimisé.

Contrôle de la granulométrie

Une poudre WC ultrafine (granulométrie de 0,2 à 1 μm) est utilisée et le procédé de frittage (1 350 à 1 450 $^{\circ}\text{C}$) est optimisé pour uniformiser la limite de grain de l'interface WC/Co et augmenter la résistance de liaison de 20 %. Cette méthode améliore la ténacité de la matrice et répond aux exigences de résistance aux chocs des tuyères aéronautiques.

dopage d'interface

Introduction d'additifs traces (tels que Cr_3C_2 , Le VC à l'interface WC/Co inhibe la croissance des grains de WC, forme une couche d'interface nanométrique (épaisseur 10-100 nm) et augmente la dureté de 5-10 % (HV 1600-1800). Cette technologie améliore la résistance à la corrosion de la matrice de l'électrode de la cellule électrolytique.

3.2 Optimisation de l'interface de revêtement

En concevant la couche de transition ou la structure d'interface entre le revêtement et le substrat en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

carbure cémenté, l'adhérence et la stabilité sont améliorées.

Revêtement dégradé

En déposant des revêtements multicouches (tels que TiN / TiCN / Al₂O₃) par dépôt PVD ou CVD, le coefficient de dilatation thermique et la dureté évoluent progressivement couche par couche, et l'adhérence est améliorée de 30 % (> 60 N). Dans les tuyères d'avions, les revêtements à gradient réduisent la fissuration sous contrainte thermique et prolongent la durée de vie de 40 %.

Prétraitement d'interface

La rugosité de la surface du substrat (Ra 0,8–2 μm) par sablage ou gravure chimique augmente l'effet d'emboîtement mécanique et améliore l'adhérence du revêtement de 20 %. Cette méthode assure la stabilité à long terme des revêtements d'électrodes des cellules électrolytiques (comme le RuO₂).

Conception de la couche de transition

μm d'épaisseur (entre le substrat et le revêtement) améliore la liaison chimique et réduit les contraintes interfaciales. Par exemple, une couche de transition en Ti augmente l'adhérence jusqu'à 70 N dans un revêtement PVD- TiN.

3.3 Modification de l'interface matricielle

Modifiez directement l'interface WC/Co ou la surface du substrat par des méthodes physiques ou chimiques pour améliorer les performances de l'interface.

Implantation ionique

Des ions à haute énergie (tels que N⁺ et C⁺) sont implantés à la surface du substrat (profondeur de 0,1 à 1 μm) pour former une couche d'interface durcie (dureté HV1500–2000), ce qui améliore la résistance à l'usure et à la corrosion. Dans les électrodes de cellules électrolytiques, l'implantation de N⁺ augmente l'efficacité de l'évolution du chlore de 15 %.

Modification de l'interface laser

Le faisceau laser est utilisé pour faire fondre ou impacter la surface du substrat afin de former une structure d'interface nanométrique (granulométrie < 100 nm), ce qui augmente la dureté de 10 % (HV 1200-1600). Cette technologie réduit le coefficient de frottement (0,1-0,2) dans le canal d'écoulement des tuyères d'aviation.

Traitement au plasma

Le plasma (tel que Ar, N₂) bombarde la surface du substrat pour éliminer les oxydes et induire une contrainte de compression, augmentant ainsi la résistance de l'interface de 20 %. Dans la cellule électrolytique, le traitement plasma améliore la résistance du revêtement aux acides.

4. Scénarios d'application de l'ingénierie d'interface

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'ingénierie des interfaces en carbure cémenté a montré une large valeur d'application dans les buses d'aviation, les cellules électrolytiques et d'autres domaines de haute performance :

Buse d'aviation

Les revêtements à gradient (tels que TiN / Al₂O₃) optimisent l'interface revêtement/substrat, améliorent l'adhérence de 30 % et prolongent de 40 % la durée de vie des injecteurs de carburant soumis à l'érosion par flux d'air à grande vitesse (de 5 000 à 7 000 heures). Le contrôle de la granulométrie améliore la résistance de l'interface WC/Co et répond aux exigences de résistance à la fatigue thermique des injecteurs de refroidissement.

Électrodes d'électrolyseur

L'implantation ionique et la conception de la couche de transition améliorent l'activité catalytique de l'interface électrode, réduisent la surtension de dégagement d'hydrogène (100-150 mV) et augmentent le rendement de 10 à 15 %. Par exemple, l'électrolyseur PEM utilise des électrodes WC-Co implantées N⁺, ce qui réduit la quantité de métaux précieux de 60 % et prolonge la durée de vie à 15 000 heures.

Outils de coupe

Le dopage d'interface (tel que Cr₃C₂) optimise l'interface WC/Co, augmente la dureté de 5 % et la résistance à l'usure de 30 %, ce qui le rend adapté à la coupe à grande vitesse.

Choix miniers

La modification de l'interface laser forme une couche durcie, ce qui améliore la résistance à l'usure de 20 % et prolonge la durée de vie.

Cas : L'injecteur de carburant du moteur GE9X utilise un revêtement à gradient PVD- TiN , avec une adhérence d'interface de 70 N, une augmentation de 30 % de la résistance à l'usure et une efficacité de combustion améliorée.

5. Avantages et défis

5.1 Avantages

Percée en matière de performances

L'ingénierie d'interface améliore considérablement l'adhérence du revêtement (> 50 N), la résistance à la corrosion et l'activité catalytique, prolongeant la durée de vie des composants de 20 à 50 % et augmentant l'efficacité de 10 à 20 %.

Optimisation collaborative

En régulant l'interface WC/Co ou revêtement/substrat, l'effet synergique entre le substrat et la couche fonctionnelle est amélioré pour répondre aux conditions de travail composites des buses d'aviation et des cellules électrolytiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Forte flexibilité

Du dopage à l'échelle nanométrique aux revêtements à gradient, la technologie peut être adaptée à différentes applications, telles que les interfaces catalytiques dans les électrolyseurs ou les interfaces résistantes à l'usure dans les buses.

Application interdisciplinaire

Cette technologie est applicable à de nombreux domaines tels que l'aviation, l'énergie et la fabrication, démontrant ainsi une grande valeur technique.

5.2 Défis

Complexité du processus

L'ingénierie d'interface nécessite un contrôle précis de la microstructure (comme la taille des grains et l'épaisseur de la couche de transition) et présente des exigences élevées en matière d'équipements et de processus (comme les équipements PVD coûtant entre 10 et 30 millions de RMB).

Coût élevé

Les technologies telles que l'implantation ionique et la modification laser ont une consommation énergétique de fonctionnement élevée (500 à 1 000 kWh/lot), ce qui limite leur application à grande échelle.

Stabilité de l'interface

Dans un environnement à haute température ou corrosif à long terme, l'interface peut se dégrader (par exemple, décollement du revêtement et désactivation du site catalytique), et la conception de l'interface doit être optimisée.

Compatibilité des matériaux

La différence entre les coefficients de dilatation thermique de différentes phases peut entraîner des fissures d'interface et de nouveaux matériaux de transition doivent être développés.

Impact environnemental

Le CVD et l'implantation ionique impliquent des gaz chimiques ou une consommation énergétique élevée, et des améliorations des processus écologiques sont nécessaires.

6. Tendances de développement futures

Afin de surmonter les défis et de promouvoir le développement de l'ingénierie des interfaces en carbure cémenté, les directions suivantes peuvent être privilégiées à l'avenir :

Conception d'interface multi-échelle

La combinaison d'un dopage à l'échelle nanométrique (< 100 nm) et de couches de transition à l'échelle micrométrique (1 à 10 μm) améliore la liaison et la stabilité de l'interface, et la durabilité est augmentée de 30 à 50 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Technologie d'interface verte

Développer des procédés PVD/CVD à basse température (< 500 °C) ou assistés par plasma pour réduire la consommation d'énergie de 30 à 50 % et réduire les émissions chimiques.

Optimisation intelligente de l'interface

En utilisant l'IA et la simulation de dynamique moléculaire, nous pouvons prédire la distribution des contraintes d'interface et les performances catalytiques, raccourcissant ainsi le cycle de R&D de 30 %.

Interface de fonction composite

Le développement d'interfaces composites résistantes à la corrosion catalytique (telles que MoN / TiN) peut augmenter l'efficacité des électrodes d'électrolyseur de 20 % et réduire l'utilisation de métaux précieux de 70 %.

Intégration de la fabrication additive

En combinant un substrat en carbure imprimé en 3D avec une modification d'interface in situ, la fabrication intégrée de pièces complexes peut être réalisée, réduisant les coûts de 20 à 30 %.

7. Caractéristiques techniques de l'ingénierie des interfaces en carbure cémenté

technologie	Mécanisme d'action	Applications typiques	Principaux avantages	Principales limites	Effet d'application
Contrôle de la granulométrie	Optimisation des joints de grains d'interface WC/Co	Buse, coupeur	Ténacité +20%, Dureté +5%	Le processus de frittage est compliqué	Résistance aux chocs de la buse +30%
Dopage d'interface	Présentation de Cr ₃ C ₂ et VC	Électrode, pic	Dureté +5-10 %, résistance à la corrosion	Difficulté à contrôler les additifs	Résistance à la corrosion des électrodes +20%
Revêtement dégradé	Transition multicouche PVD/CVD	Buse, électrode	Adhérence +30%, résistance aux contraintes thermiques	Coût élevé de l'équipement	Durée de vie de la buse +40%
Prétraitement d'interface	Sablage, gravure chimique	Électrode, outil	Force de liaison +20%, processus simple	Augmentation de la rugosité de surface	Stabilité de l'électrode +25%
Implantation ionique	N ⁺ , C ⁺	Électrode, buse	Activité catalytique +15%, pas d'interface	Profondeur limitée et coût élevé	Efficacité de l'évolution de l'hydrogène +10%
Modification au laser	Durcissement de l'interface à l'échelle nanométrique	Buse, pic	Coefficient de frottement 0,1-0,2, haute précision	Consommation d'énergie élevée	Résistance à l'usure des canaux +20%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Traitement plasma	au	Éliminer les oxydes et les contraintes de compression	Électrode, réservoir	Force de liaison +20%, résistance aux acides	Équipement complexe	Résistance à la corrosion des électrodes +30%
-------------------	----	---	----------------------	--	---------------------	---

illustrer:

Mécanisme d'action : Aperçu du mécanisme de base de la technologie.

Applications typiques : buses d'aviation, électrolyseurs , etc.

Avantages et inconvénients : comparez les performances et les limites.

Effet d'application : Mettre en évidence la contribution de la buse et de la cellule électrolytique.

Source des données : rapport USGS 2024 et normes techniques du carbure cémenté.

L'ingénierie des interfaces en carbure cémenté offre des solutions révolutionnaires pour les applications hautes performances telles que les buses aéronautiques et les électrodes de cellules électrolytiques, en contrôlant précisément la microstructure et les propriétés de l'interface WC/Co et de l'interface revêtement/substrat. Le revêtement par gradient, l'implantation ionique et d'autres technologies améliorent considérablement la liaison de l'interface, la résistance à la corrosion et l'activité catalytique, prolongeant la durée de vie des buses de 40 % et améliorant le rendement de l'électrolyse de 10 à 20 %. Bien que la complexité des procédés, le coût et la stabilité de l'interface demeurent des défis, l'intégration d'une conception multi-échelle, de procédés écologiques et d'une optimisation intelligente propulsera la technologie vers de nouveaux sommets. L'ingénierie des interfaces est non seulement essentielle à l'amélioration des performances du carbure cémenté, mais elle contribue également fortement au développement durable des secteurs de l'aviation, de l'énergie et de la fabrication, démontrant ainsi la synergie profonde entre la science des matériaux et les applications de l'ingénierie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Technologie de modification de surface en carbure cémenté

1. La connotation et l'importance de la modification de surface du carbure cémenté

Le carbure cémenté (WC-Co) est composé de carbure de tungstène (WC) comme matrice dure et de cobalt (Co) comme phase liante. Grâce à son excellente dureté (HV1000–1800), sa résistance à l'usure et sa stabilité à haute température, il est devenu un matériau essentiel dans des domaines de haute performance tels que les outils de coupe, les pics miniers et les buses d'aviation. Cependant, dans des conditions de travail extrêmes, telles que l'érosion par gaz à haute température (1000–1600 °C), les impacts à haute pression (10–30 MPa) ou la corrosion par sulfure de carburant des buses d'aviation, la surface du carbure cémenté peut subir des phénomènes d'usure, d'oxydation ou de rupture par fatigue, limitant ainsi sa durée de vie et sa fiabilité. La technologie de modification de surface du carbure cémenté utilise des moyens physiques, chimiques ou mécaniques pour contrôler précisément la composition chimique, la microstructure ou les propriétés physiques de la couche superficielle, améliorant ainsi considérablement les performances de surface tout en préservant les excellentes propriétés mécaniques du matériau de la matrice. Cette technologie est non seulement la clé pour prolonger la durée de vie des pièces, mais également un moteur important du progrès technologique dans des secteurs tels que l'aviation et la fabrication.

L'objectif principal de la modification de surface est d'optimiser les performances du carbure cémenté dans des environnements spécifiques. Par exemple, dans les tuyères d'aviation, la modification de surface peut améliorer la résistance à l'usure pour faire face au décapage par un flux d'air à grande vitesse, la résistance à la corrosion pour résister à l'érosion chimique du carburant, ou encore la résistance aux températures élevées pour s'adapter aux conditions extrêmes de la chambre de combustion. Ces améliorations prolongent non seulement la durée de vie de la tuyère (de 5 000 à 8 000 heures), mais améliorent également le rendement de combustion (5 à 10 %), favorisant ainsi les économies d'énergie, la réduction des émissions et l'optimisation des performances des moteurs d'aviation. De plus, la technologie de modification de surface peut répondre aux besoins de diverses applications telles que les outils de coupe et les moules en réduisant le coefficient de frottement ou en améliorant la résistance à la fatigue, démontrant ainsi sa vaste valeur technique .

2. Principales approches de la technologie de modification de surface du carbure cémenté

Les technologies de modification de surface du carbure cémenté couvrent trois catégories : le revêtement de surface, la modification chimique de surface et la modification mécanique de surface. Chaque type de technologie confère des fonctions spécifiques à la surface du carbure cémenté par le biais de mécanismes d'action différents, afin de répondre aux exigences de conditions de travail complexes. Voici une analyse approfondie des caractéristiques de chaque type de technologie, du point de vue des principes du procédé, des scénarios d'application et des effets.

2.1 Technologie de revêtement de surface : construction d'une barrière protectrice

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La technologie de revêtement de surface consiste à déposer une ou plusieurs couches de matériaux fonctionnels (tels que des céramiques, des métaux ou des composites) sur la surface du carbure cimenté afin de former une barrière protectrice pour le substrat, améliorant ainsi considérablement la résistance à l'usure, à la corrosion et aux températures élevées. Cette technologie est particulièrement répandue dans les tuyères aéronautiques, car elle permet de lutter efficacement contre l'érosion à haute température et la corrosion chimique.

Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

Le PVD utilise des procédés physiques (tels que la pulvérisation cathodique ou l'évaporation) sous vide pour déposer des matériaux de revêtement (tels que le nitrure de titane TiN et l'oxyde d'aluminium Al_2O_3) sous forme atomique ou moléculaire sur la surface du carbure cimenté afin de former un film d'une épaisseur de 1 à 10 μm . La température du procédé PVD est basse (200 à 500 $^{\circ}C$), ce qui évite la dégradation des performances du substrat. La dureté du revêtement peut atteindre HV2000–3000 et présente une forte adhérence ($> 50 N$). Dans les tuyères d'aviation, les revêtements TiN peuvent améliorer considérablement la résistance à l'usure des tuyères de carburant, prolongeant leur durée de vie de 30 % sous un flux d'air à grande vitesse. Cependant, les revêtements PVD sont minces et peuvent se détacher en cas d'impact extrême, ce qui limite leur application dans des conditions de forte charge.

Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Le CVD convertit les précurseurs gazeux (tels que le tétrachlorure de titane $TiCl_4$) en revêtements solides (tels que le carbure de titane TiC_4 , Al_2O_3) d'une épaisseur de 5 à 20 μm par réactions chimiques à haute température (800 à 1 000 $^{\circ}C$). Les revêtements CVD sont épais et denses, et sont particulièrement adaptés aux environnements à haute température, comme le revêtement Al_2O_3 des tuyères de refroidissement des turboréacteurs, qui peut supporter des températures élevées de 1 500 $^{\circ}C$ et résister à la corrosion oxydative. Cependant, les procédés à haute température peuvent ramollir la phase cobalt du substrat, augmenter la difficulté du contrôle du procédé et entraîner des coûts d'équipement élevés (environ 10 à 30 millions de RMB).

Projection thermique La projection thermique forme un revêtement d'une épaisseur de 50 à 500

μm sur la surface en pulvérisant des matériaux fondus ou semi-fondus (tels que le WC-Co, le carbure de chrome Cr_3C_2) à grande vitesse. Cette technologie est adaptée aux pièces de grande taille, comme le col des tuyères de turbines à gaz, et son revêtement épais peut résister efficacement à l'érosion par gaz à grande vitesse. Cependant, le revêtement par projection thermique a une faible force de liaison (20 à 40 MPa) et une surface rugueuse (Ra 2 à 5 μm), ce qui nécessite un traitement ultérieur pour répondre aux exigences de précision des tuyères d'aviation (par exemple $Ra < 0,4 \mu m$).

2.2 Modification chimique de surface : remodelage de la structure de surface

La modification chimique de surface améliore les propriétés de surface du carbure cimenté en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

introduisant de nouveaux éléments ou en modifiant la composition chimique de la couche superficielle. Cette méthode agit directement sur la surface du matériau pour former une couche modifiée qui adhère parfaitement au substrat, particulièrement adaptée aux pièces de haute précision.

L'implantation

utilise des faisceaux d'ions à haute énergie (tels que l'azote N^+ , le carbone C^+) pour bombarder la surface, incorporant des ions dans la couche superficielle (profondeur de 0,1 à 1 μm), formant des composés durcis (tels que WN, WC) et améliorant la dureté (HV1500-2000) et la résistance à l'usure. L'implantation ionique ne présente pas d'interface de revêtement évidente et préserve les propriétés du substrat. Elle convient au renforcement résistant à l'usure de la surface microporeuse des buses d'aviation, et la résistance à l'usure peut être améliorée de 20 %. Cependant, la profondeur de modification limitée et le coût élevé de l'équipement (environ 10 millions de RMB) limitent son application aux pièces de grande surface.

Traitement thermique chimique (carburation, nitruration) :

Le traitement thermique chimique utilise une température élevée (800-1 000 $^{\circ}C$) pour faire pénétrer les atomes de carbone ou d'azote à la surface et former une couche de composé dur (épaisseur de 10 à 100 μm). La dureté superficielle du carbure cémenté nitruré peut atteindre HV1 500-2 000, et sa résistance à l'usure est considérablement améliorée, ce qui convient aux pièces résistantes à l'usure des pics miniers ou des buses d'aviation. Cependant, une température élevée peut réduire la ténacité de la matrice, et les paramètres du procédé doivent être contrôlés avec précision pour équilibrer les performances.

2.3 Modification mécanique de surface : Optimisation de la morphologie et des contraintes

La modification mécanique de surface modifie la morphologie ou l'état de contrainte de la surface par une action physique afin d'améliorer la résistance à la fatigue ou à l'usure. Cette méthode est simple, peu coûteuse et adaptée à diverses conditions de travail.

Grenailage de précontrainte :

Le grenailage de précontrainte utilise des projectiles à grande vitesse (tels que des grenailles d'acier et de céramique) pour bombarder la surface, induisant une contrainte de compression et améliorant la résistance à la fatigue. Il peut prolonger de 30 % la durée de vie en fatigue des canaux d'écoulement des tuyères d'aviation et est particulièrement adapté aux pièces soumises à des contraintes thermiques cycliques. Cependant, il augmente la rugosité de surface (Ra 0,8–2 μm), ce qui peut affecter l'efficacité du fluide et nécessiter un polissage ultérieur.

Modification de surface au laser. La

modification de surface au laser utilise un faisceau laser pour faire fondre ou impacter la surface afin de former une couche durcie (profondeur 0,1-1 mm) ou une micro-nanostructure, augmentant la dureté (HV1200-1600) et réduisant le coefficient de frottement (0,1-0,2). À la surface des micropores des buses d'aviation, la modification au laser peut optimiser la dynamique des fluides et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

réduire l'usure de l'adhésif. Cependant, l'équipement laser est coûteux (environ 5 millions de yuans) et consomme beaucoup d'énergie ; le processus doit donc être optimisé pour réduire les coûts d'exploitation.

3. Application de la modification de surface au carbure cimenté dans les tuyères d'aviation

Composants essentiels des moteurs d'avion (turboréacteurs, turbomoteurs) et des turbines à gaz, les tuyères d'aviation doivent fonctionner de manière stable dans des environnements à haute température, haute pression et corrosifs. La technologie de modification de surface au carbure cimenté améliore considérablement les performances et la durée de vie des tuyères en améliorant leur résistance à l'usure, à la corrosion et aux températures élevées. Par exemple :

Buse de carburant

PVD- TiN est appliqué aux injecteurs de carburant du moteur GE9X (diamètre 0,1-0,5 mm), ce qui améliore la résistance à l'usure de 30 %, augmente la durée de vie de 5 000 heures à 7 000 heures et augmente l'efficacité de la combustion de 5 %.

Buse de refroidissement

CVD- Al_2O_3 est utilisé pour les buses de refroidissement des turboréacteurs. Il résiste à des températures élevées (1 500 °C), réduit la corrosion par oxydation et prolonge les cycles de maintenance de 30 %.

gorge de la buse

Les revêtements WC-Co projetés thermiquement sont utilisés dans les buses de turbines à gaz pour résister à l'érosion du gaz à grande vitesse et prolonger la durée de vie de 20 %.

Surface du canal d'écoulement : le grenailage et la modification au laser améliorent la résistance à la fatigue du canal d'écoulement, s'adaptent aux contraintes thermiques cycliques et augmentent la durée de vie en fatigue de 30 %.

Ces applications améliorent non seulement la fiabilité des buses, mais optimisent également l'efficacité énergétique et les performances d'émission des moteurs, contribuant ainsi au développement durable de l'industrie aéronautique ? web:9 ? .

4. Avantages et limites de la technologie de modification de surface au carbure cimenté

La technologie de modification de surface au carbure cimenté offre des améliorations de performances significatives pour les pièces hautes performances, mais elle présente également certaines limites :

Avantages de la technologie de modification de surface au carbure cimenté :

Optimisation des performances

La résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la résistance aux hautes températures sont

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

améliorées de 20 à 50 %, prolongeant la durée de vie des pièces et répondant à des conditions de travail difficiles telles que les buses d'aviation.

Protection du substrat

La modification agit uniquement sur la surface, conservant l'excellente résistance (2000–2500 MPa) et la ténacité de la matrice WC-Co.

Personnalisation flexible

Des revêtements en couches minces (PVD) aux revêtements épais (projection thermique), des couches durcies (implantation ionique) à la micro- nanostructuration (laser), la technologie peut être sélectionnée en fonction des besoins.

Limites de la technologie de modification de surface au carbure cémenté :

Coût élevé

L'investissement en équipement est important (par exemple, un four PVD/CVD coûte entre 10 et 30 millions de RMB) et la consommation d'énergie de fonctionnement est élevée (500 à 1 000 kWh par lot).

Processus complexe

Les paramètres (tels que la température CVD et la dose d'implantation ionique) doivent être contrôlés avec précision, et l'état de surface du substrat affecte l'effet.

Limites d'applicabilité

Les revêtements minces (PVD 1–10 μm) sont susceptibles de s'écailler sous l'effet d'une forte érosion, et la profondeur de modification chimique (0,1–100 μm) n'est pas suffisante pour faire face à l'usure à long terme.

5. Défis de la technologie de modification de surface du carbure cémenté

Bien que la technologie de modification de surface au carbure cémenté ait montré un grand potentiel dans des domaines tels que les buses d'aviation, sa promotion et son application sont toujours confrontées aux défis suivants :

Économique

Le coût des équipements et des procédés à haute performance limite leur application dans les petites et moyennes entreprises, en particulier dans la production de masse, où les performances et les coûts doivent être équilibrés.

Stabilité et fiabilité

L'adhérence du revêtement (20–50 MPa) ou l'uniformité de la couche modifiée est affectée par la propreté et la rugosité de la surface du substrat, et la technologie de prétraitement doit être améliorée.

Adaptabilité aux conditions de travail extrêmes

Les performances à long terme des buses d'aviation soumises à une érosion à haute température et à des contraintes cycliques doivent encore être vérifiées, et le pelage des revêtements minces ou l'usure des couches modifiées sont des goulots d'étranglement majeurs.

Durabilité environnementale

Le CVD implique des émissions de gaz chimiques, la pulvérisation thermique et la modification au laser ont une consommation d'énergie élevée et des procédés écologiques doivent être développés

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pour répondre aux exigences de protection de l'environnement.

Compatibilité des matériaux

La différence de coefficient de dilatation thermique entre la couche modifiée et la matrice WC-Co (par exemple, Al_2O_3 $8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ contre WC-Co $5-7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) peut provoquer des fissures dues aux contraintes thermiques et la conception de l'interface doit être optimisée.

6. Orientation future du développement de la technologie de modification de surface du carbure cémenté

Afin de relever les défis et d'améliorer encore la valeur d'application de la technologie de modification de surface en carbure cémenté, des avancées peuvent être réalisées dans les directions suivantes à l'avenir :

Revêtement composite multicouche

Structures multicouches PVD / CVD (telles que TiN / Al_2O_3 / TiC), combinant une dureté élevée et une ténacité élevée, améliorant la résistance à l'usure de 50% et la capacité anti-pelage de 30%, répondant aux conditions de travail complexes des buses d'aviation.

Innovation en matière de procédés verts

Promouvoir le CVD à basse température ($< 600^\circ\text{C}$) ou le PVD assisté par plasma pour réduire la consommation d'énergie de 30 à 50 % ; développer des précurseurs respectueux de l'environnement pour réduire les émissions chimiques.

Conception de surface intelligente

Grâce à la micro-nanostructure laser ou au revêtement autolubrifiant (tel que MoS_2 , DLC), le coefficient de frottement peut être réduit à moins de 0,1, améliorant ainsi l'efficacité du fluide de la buse.

Intégration de la fabrication additive

La combinaison de substrats en carbure imprimés en 3D avec une modification de surface (comme la modification laser in situ) peut permettre une fabrication intégrée de pièces complexes et réduire les coûts de 20 à 30 %.

Optimisation basée sur les données

Utilisez l'intelligence artificielle et la simulation de dynamique moléculaire pour prédire les performances et la durée de vie du revêtement, raccourcir le cycle de R&D de 30 % et accélérer l'itération technologique.

7. Résumé

Caractéristiques techniques de la modification de surface en carbure cémenté

technologie	Mécanisme d'action	Applications typiques	Principaux avantages	Principales limites	Effet tuyère d'aviation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

PVD	Dépôt physique de couches minces 1 à 10	Outils de coupe, micropores de buse	Dureté élevée HV2000–3000, procédé à basse température	Revêtement mince, faible résistance aux chocs	Résistance à l'usure des injecteurs de carburant +30%, durée de vie 7000 heures
maladies cardiovasculaires	Dépôt chimique de revêtement épais 5–20	Buse, pic	Résistance à haute température 1500°C, résistance à la corrosion	Les températures élevées endommagent le substrat et sont coûteuses	Résistance à la température de la buse de refroidissement 1500°C, cycle de maintenance +30%
Projection thermique	Pulvérisation d'un revêtement épais 50–500	Gorge de buse, moule	Revêtement épais anti-érosion	Faible force de liaison et faible précision	Durée de vie de la buse de la turbine à gaz +20 %
Implantation ionique	Couche de durcissement par incorporation d'ions 0,1–1	Couteau, buse	Aucune interface, haute précision	Profondeur limitée et équipement coûteux	Résistance à l'usure des micropores +20%
Traitement thermique chimique	Durcissement par cémentation/nitruration 10–100	Pic, buse	Dureté élevée, coût modéré	La température élevée affecte la ténacité	Dureté des pièces résistantes à l'usure : HV1500–2000
Grenaillage	Contrainte de compression induite par un projectile	Canal d'écoulement de la buse	Anti-fatigue, faible coût	Rugosité accrue	Durée de vie en fatigue du coureur +30%
Modification laser	Durcissement au laser/micro-nanostructure	Buse, moule	Haute précision et faible frottement	Consommation d'énergie élevée et coût élevé	Coefficient de frottement des micropores 0,1–0,2

illustrer:

Mécanisme d'action : Aperçu des principes fondamentaux de la technologie.

Applications typiques : Énumérez les principaux scénarios d'utilisation.

Avantages et inconvénients : comparez les performances et les limites.

Effet de buse aérodynamique : met en évidence la contribution spécifique dans la buse.

Source des données : rapport USGS 2024 et normes techniques du carbure cémenté ? web:9,23 ? .

en conclusion

Grâce à un revêtement sophistiqué et à un traitement chimique ou mécanique, la technologie de modification de surface au carbure cémenté confère aux matériaux WC-Co une excellente résistance à l'usure, à la corrosion et aux hautes températures, ce qui lui permet de briller dans des domaines de haute performance tels que les buses et les outils de coupe pour l'aviation. Dans les buses aéronautiques, les revêtements PVD et CVD traitent efficacement l'érosion à haute température, tandis que le grenaillage et la modification laser améliorent considérablement la résistance à la fatigue, prolongent considérablement la durée de vie des pièces de 20 à 50 % et optimisent le rendement de combustion de 5 à 10 %. Bien que le coût élevé, la complexité des procédés et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'adaptabilité aux conditions de travail extrêmes demeurent des défis, l'intégration des revêtements composites multicouches, des procédés écologiques et de la fabrication additive propulsera la technologie vers un niveau supérieur. La technologie de modification de surface au carbure cémenté est non seulement à la pointe de l'innovation en science des matériaux, mais elle insuffle également une forte impulsion au développement efficace, fiable et durable de l'industrie aéronautique, démontrant ainsi l'intégration profonde de la science et de l'ingénierie.

appendice:

Application du revêtement nanocomposite en carbure cémenté dans les cellules électrolytiques

1. Contexte du carbure cémenté et du revêtement nanocomposite

Le carbure cémenté (WC-Co), dont la phase dure est le carbure de tungstène (WC) et la phase liante le cobalt (Co), est largement utilisé dans les buses d'aviation, les outils de coupe et les pièces industrielles résistantes à l'usure grâce à sa dureté élevée (HV1000–1800), son excellente résistance à l'usure et sa stabilité à haute température. Cependant, dans des environnements extrêmes tels que les cellules électrolytiques, avec des électrolytes acides et alcalins forts (pH 1–14), des températures élevées (50–80 °C) et des densités de courant élevées (0,1–10 A/cm²), les surfaces en carbure cémenté peuvent être confrontées à des problèmes tels que la corrosion, l'usure ou une performance catalytique insuffisante. Les revêtements nanocomposites, technologie avancée de modification de surface, améliorent significativement la résistance à la corrosion, l'activité catalytique et les propriétés mécaniques des surfaces en carbure cémenté en combinant des particules nanométriques (telles que le SiC, TiO₂, CNT) ou des films minces (épaisseur 1–100 nm) avec des matrices métalliques ou céramiques, offrant une solution idéale pour les électrodes, les réservoirs ou les pièces résistantes à la corrosion dans les cellules électrolytiques.

L'application des revêtements nanocomposites dans les électrolyseurs vise principalement à améliorer l'efficacité électrocatalytique des électrodes, à prolonger leur durée de vie et à réduire l'utilisation de métaux précieux (tels que le platine et l'iridium). Par exemple, dans les électrolyseurs à hydrogène (tels que les électrolyseurs PEM), les revêtements nanocomposites permettent de réduire de 10 à 40 fois la charge en platine tout en maintenant une activité catalytique élevée. Dans le domaine des tuyères aéronautiques, des technologies similaires sont également utilisées pour améliorer la résistance à l'usure et à la corrosion, ce qui témoigne de leur large applicabilité dans des conditions de travail extrêmes.

Grâce à une conception précise du revêtement, les revêtements nanocomposites en carbure cémenté optimisent non seulement les performances des cellules électrolytiques, mais favorisent également le développement durable de la technologie de l'énergie verte.

2. Caractéristiques du revêtement nanocomposite en carbure cémenté

Les revêtements nanocomposites sont composés d'au moins deux phases non miscibles (telles qu'une matrice métallique et des nanoparticules), et l'interface présente une structure nanométrique (taille des grains ou particules < 100 nm). Leurs propriétés uniques découlent de la synergie des effets nanométriques, notamment l'effet de petite taille, l'amélioration de l'interface et l'effet quantique. Voici leurs principales caractéristiques :

Dureté et résistance à l'usure élevées

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nanoparticules (telles que SiC , Des alliages d'aluminium (Al_2O_3) sont intégrés dans la matrice (tels que Ni-P, WC-Co), avec une dureté allant jusqu'à HV2000–3000 et une résistance à l'usure augmentée de 30 à 50 %, ce qui convient à l'usure mécanique à laquelle sont soumises les électrodes des cellules électrolytiques.

Excellente résistance à la corrosion

La structure dense et l'inertie chimique du nano-revêtement (tel que TiN et MoN) bloquent efficacement les électrolytes corrosifs (tels que l'acide sulfurique et l'hydroxyde de potassium), réduisant ainsi le taux de corrosion de 50 à 90 %.

Électrocatalyse hautement efficace

Les sites actifs à l'échelle nanométrique (tels que RuO_2 et IrO_2) augmentent la surface de réaction, réduisent la surtension d'évolution hydrogène/oxygène (50–200 mV) et améliorent l'efficacité de l'électrolyse de 10 à 20 %.

Stabilité thermique

Les revêtements restent stables à la température de fonctionnement de l'électrolyseur de 50 à 80 °C, et certains revêtements (tels que $Al_2O_3 - TiO_2$) peut supporter des températures plus élevées (> 200 °C).

Faible dépendance aux métaux précieux

Les nanoparticules (telles que MoN et CNT) peuvent réduire les coûts de 50 à 80 %, répondant ainsi aux besoins de la fabrication verte.

Ces propriétés rendent les revêtements nanocomposites idéaux pour les électrodes d'électrolyseur et les composants résistants à la corrosion, en particulier dans la production d'énergie à base d'hydrogène (par exemple, l'électrolyse de l'eau) et l'industrie du chlore et de la soude.

3. Méthode de préparation

La préparation de revêtements nanocomposites en carbure cémenté nécessite de prendre en compte l'uniformité du revêtement, l'adhérence et le contrôle précis de la nanostructure. Les principales méthodes suivantes sont analysées en combinaison avec les caractéristiques d'application des cellules électrolytiques :

3.1 Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

TiN et ZrO_2) à la surface du carbure cémenté par pulvérisation cathodique ou évaporation pour former un film d'une épaisseur de 1 à 10 μm . La température du procédé est basse (200 à 500 °C), ce qui est adapté à la préparation de revêtements de précision pour électrodes de cellules électrolytiques. Les revêtements PVD ont une dureté élevée (HV 2000 à 3000) et une forte adhérence (> 50 N). Ils sont utilisés pour déposer des revêtements TiN dans les cellules électrolytiques PEM afin d'améliorer la résistance à la corrosion et l'activité catalytique des électrodes. Cependant, les revêtements PVD sont minces et ont une résistance limitée à l'usure sous forte charge.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2 Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Le CVD dépose des revêtements épais (5–20 μm), tels que TiC ou $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$, par des réactions chimiques à haute température (600–1000 $^\circ\text{C}$), qui conviennent à la protection contre la corrosion des corps de cellules électrolytiques ou des électrodes. Les revêtements CVD sont denses et résistants aux températures élevées, mais ils peuvent provoquer un ramollissement de la phase cobalt du carbure cimenté à haute température, et le processus doit être optimisé pour réduire la température de dépôt. Les cellules électrolytiques chlore-alcali utilisent souvent des électrodes revêtues CVD- RuO_2 , qui augmentent l'efficacité de l'évolution du chlore de 15 %.

3.3 Placage autocatalytique

Le dépôt autocatalytique consiste à déposer un revêtement nanocomposite à base de Ni-P sur la surface du carbure cimenté par réduction chimique, en y intégrant des nanoparticules (telles que SiC et CNT). L'épaisseur du revêtement est réglable (5 à 50 μm) et offre une grande uniformité, ce qui convient aux électrodes à géométrie complexe. Après traitement thermique, la phase Ni_3P cristallise, augmentant la dureté à HV1500–2000 et la résistance à l'usure étant améliorée de 30 %. Dans la cellule électrolytique, le revêtement Ni-P/ SiC est utilisé pour les électrodes résistantes à la corrosion, et son coût est inférieur à celui du PVD/CVD.

3.4 Électrodéposition

L'électrodéposition permet de déposer des revêtements nanocomposites à base de Co-P ou de Ni-P par des réactions électrochimiques, dopés avec des nanoparticules (telles que Al_2O_3 , TiO_2). Le procédé est simple, peu coûteux (l'équipement coûte environ 1 à 5 millions de RMB) et adapté à la production à grande échelle. Les revêtements Co-P/ Al_2O_3 présentent une résistance élevée à la corrosion sur les électrodes des cellules électrolytiques, réduisant le taux de corrosion de 70 %. Cependant, l'uniformité du revêtement électrodéposé est affectée par la densité de courant, et les paramètres du procédé doivent être optimisés.

3.5 Oxydation électrolytique au plasma (PEO)

Al_2O_3) dans l'électrolyte sous haute tension (350–500 V), avec une épaisseur de 3–10 μm , ce qui convient à la protection anticorrosion des cuves ou électrodes en carbure cimenté. Le revêtement PEO présente une faible porosité et une excellente résistance à la corrosion, et convient aux cellules électrolytiques alcalines (comme l'électrolyte KOH). L'ajout de nanoparticules (comme V_2O_5) peut encore améliorer les performances électrocatalytiques, avec un taux d'élimination de la DCO de 90 %.

4. Scénarios d'application dans les électrolyseurs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les revêtements nanocomposites en carbure cémenté sont principalement utilisés pour les électrodes, les corps de cuve et les pièces résistantes à la corrosion des cellules électrolytiques. Parmi les applications typiques, on peut citer :

Électrolyseur à hydrogène (PEM, électrolyseur alcalin)

Les revêtements nanocomposites (tels que MoN et Ni-P/CNT) sont utilisés pour les électrodes afin de réduire la surtension de dégagement d'hydrogène (100–150 mV), de réduire la charge en platine de 10 à 40 fois et d'améliorer l'efficacité de l'électrolyse de 15 %. Par exemple, le revêtement MoN de Naco Technologies est le premier des électrolyseurs PEM et améliore la durabilité de 30 %.

Industrie du chlore et de la soude

de RuO₂ ou d'IrO₂ sont utilisées pour la réaction d'évolution du chlore, avec une efficacité catalytique augmentée de 20 %, une forte résistance à la corrosion alcaline (pH 14) et une durée de vie prolongée de 50 %.

Traitement de l'eau par électrolyse

Ni-P/ SiC sont utilisées dans les électrolyseurs de traitement des eaux usées , avec un taux d'élimination de la DCO de 95 % et une meilleure résistance aux acides (pH 1–3) que les électrodes traditionnelles.

Électrolyse liée à l'aviation

Dans la fabrication aéronautique, les cellules électrolytiques sont utilisées pour le traitement de surface (comme l'anodisation) et les revêtements nano-composites (tels que TiN) protègent les électrodes, augmentant la résistance à l'usure de 30 %, ce qui est cohérent avec les exigences de résistance à la corrosion des buses d'aviation.

Cas : Un électrolyseur PEM utilise des électrodes à revêtement nanocomposite Ni-P/ TiO₂ , ce qui augmente l'efficacité de l'évolution de l'hydrogène de 10 %, augmente la durée de vie de 10 000 heures à 15 000 heures, réduit l'utilisation de métaux précieux de 60 % et réduit considérablement les coûts de production d'hydrogène.

5. Avantages et défis

5.1 Avantages

Excellentes performances

La dureté (HV2000–3000), la résistance à la corrosion et l'activité catalytique du revêtement nano sont nettement meilleures que celles des revêtements traditionnels, et l'efficacité de l'électrolyse est augmentée de 10 à 20 %.

Économies de coûts

Réduisez l'utilisation de métaux précieux (tels que Pt, Ir) , réduisez les coûts de production de 50 à 80 % et conviennent aux applications d'énergie verte à grande échelle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Grande uniformité

Les technologies de dépôt autocatalytique et PEO permettent un revêtement uniforme d'électrodes complexes, adaptées aux microcanaux ou aux structures poreuses.

Respectueux de l'environnement

Les nano-revêtements prolongent la durée de vie des électrodes, réduisent la fréquence de remplacement et réduisent la consommation de ressources et le rejet de déchets.

5.2 Défis

Coût de préparation

Les équipements PVD/CVD sont coûteux (10 à 30 millions de RMB) et consomment beaucoup d'énergie de fonctionnement (500 à 1 000 kWh/lot), ce qui limite les applications de petite et moyenne taille.

Stabilité du revêtement

Les nanorevêtements peuvent se décoller sous l'effet d'une densité de courant élevée à long terme, et l'adhérence (20 à 50 MPa) doit être encore améliorée.

Complexité du processus

La dispersion des nanoparticules et l'uniformité du revêtement sont affectées par l'état de surface du substrat et nécessitent un prétraitement strict.

Impact environnemental

Le CVD implique des émissions de gaz chimiques et le coût du traitement des déchets liquides issus du dépôt autocatalytique est élevé. Il est donc nécessaire de développer des procédés écologiques.

Nanotoxicité

Certaines nanoparticules (comme les CNT) peuvent être toxiques pour l'environnement, il faut donc sélectionner des matériaux non toxiques (comme le SiC et l'Al₂O₃).

6. Orientation du développement futur

Afin de surmonter les défis et de promouvoir l'application de revêtements nanocomposites en carbure cémenté dans les cellules électrolytiques, les directions suivantes peuvent être privilégiées à l'avenir :

Revêtement composite multifonctionnel

Développer des nano-revêtements multicouches (tels que TiN / RuO₂ / MoN) qui combinent une activité catalytique élevée avec une résistance à la corrosion pour augmenter l'efficacité de l'électrolyse de 20 à 30 %.

Technologie de préparation verte

Promouvoir le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) à basse température (< 500 °C) ou le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma pour réduire la consommation d'énergie de 30 à 50 % et réduire les déchets chimiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Optimisation des nanoparticules

En utilisant des nanoparticules non toxiques (telles que SiO₂ et TiO₂) pour remplacer les métaux précieux peut réduire les coûts de 50 % tout en améliorant la sécurité environnementale.

Intégration de la fabrication additive

En combinant des électrodes en carbure imprimées en 3D avec le dépôt in situ de nano-revêtements, la fabrication intégrée de structures complexes est obtenue, réduisant les coûts de 20 %.

Surveillance et conception intelligentes

Grâce à l'IA et à la simulation de dynamique moléculaire, la structure du revêtement est optimisée, la durée de vie et les performances sont prédites et le cycle de R&D est raccourci de 30 %.

7. Tableau récapitulatif

Caractéristiques principales et points techniques du revêtement nanocomposite en carbure cémenté dans une cellule électrolytique

technologie	Mécanisme d'action	Applications typiques	Principaux avantages	Principales limites	Effet électrolyseur
PVD	Dépôt physique de nanofilms (1–10 μ m)	Électrodes d'électrolyseur PEM	Dureté élevée (HV2000–3000), activité catalytique élevée	Revêtement mince, coût élevé	Efficacité de l'évolution de l'hydrogène +10%, durée de vie +30%
maladies cardiovasculaires	Revêtements épais déposés chimiquement (5–20 μ m)	Électrode chlorure alcali	Résistance aux hautes températures (1500°C), résistance à la corrosion	Dommages causés au substrat par des températures élevées	Efficacité de dégagement de chlore +15%, durée de vie +50%
Dépôt autocatalytique	Revêtements à base de Ni-P chimiquement réduits (5–50 μ m)	Électrode de traitement des eaux usées	Grande uniformité et faible coût	Le traitement des eaux usées est compliqué	Taux d'élimination de la DCO 95 %, forte résistance aux acides
Électrodéposition	Revêtements à base de Co-P déposés électrochimiquement (5–50 μ m)	Électrode à hydrogène	Procédé simple, résistance à la corrosion	L'uniformité doit être optimisée	Taux de corrosion -70%, faible coût
PEO	Revêtement céramique par oxydation plasma (3–10 μ m)	électrolyseur alcalin	Faible porosité, résistance à la corrosion	Haute tension, forte consommation d'énergie	Taux d'élimination de la DCO 95 %, forte résistance aux alcalis

illustrer:

Mécanisme d'action : Aperçu du mécanisme de base de la technologie.

Applications typiques : répertorier les scénarios liés à l'électrolyseur .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Avantages et inconvénients : comparez les performances et les limites.

électrolyseur : met en évidence la contribution spécifique dans l' électrolyseur .

Source des données : rapport USGS 2024 et documents techniques associés. web:0,1,9,14,23

8. Conclusion

Les revêtements nanocomposites en carbure cémenté offrent une excellente résistance à l'usure, à la corrosion et des performances électrocatalytiques pour les électrodes d'électrolyseurs et les pièces résistantes à la corrosion, grâce à l'association de particules ou de films nanométriques à une matrice WC-Co. Dans les électrolyseurs d'hydrogène, l'industrie du chlore et de la soude et le traitement des eaux usées, ces revêtements améliorent considérablement le rendement de l'électrolyse (10 à 20 %), prolongent la durée de vie (30 à 50 %) et réduisent la dépendance aux métaux précieux, démontrant ainsi leur fort potentiel dans le domaine des énergies vertes. À l'instar des exigences de résistance à la corrosion des tuyères d'aviation, l'application de revêtements nanocomposites aux électrolyseurs témoigne d'une innovation transversale en science des matériaux. Cependant, les coûts de préparation élevés, la stabilité des revêtements et l'impact environnemental restent à maîtriser. À l'avenir, grâce à l'intégration de revêtements composites multifonctionnels, de procédés écologiques et de la fabrication additive, les revêtements nanocomposites en carbure cémenté favoriseront le développement de la technologie des électrolyseurs dans une direction efficace et durable, insufflant un nouvel élan à la transformation énergétique mondiale et à la modernisation industrielle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

Qu'est-ce que le carbure cimenté nano-revêtu

Le carbure cimenté nano-revêtu fait référence à un revêtement d'une épaisseur de nanomètres (généralement 1100 nm) déposé sur la surface d'un substrat en carbure cimenté (tel que WC+ Co , WC+ Ni) par des méthodes physiques ou chimiques pour améliorer significativement la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion, la résistance aux hautes températures et les propriétés de surface, tout en maintenant la dureté élevée (1 400 à 2 200 HV) et la résistance (1,8 à 2,8 GPa) du substrat. Les nanorevêtements sont largement utilisés dans les outils aéronautiques, les joints sous-marins, les corps de pompes chimiques et les moules en raison de leur structure granulaire ultra-fine (granulométrie < 100 nm), de leur densité d'interface élevée et de leur excellente adhérence, répondant aux exigences de conditions de travail extrêmes (telles que des températures élevées de 800 à 1 200 °C, des pressions élevées de 15 000 psi, des fluides corrosifs).

Cet article combine les normes nationales (telles que GB/T 183762014, GB/T 79972017) et les pratiques de l'industrie pour présenter en détail la définition, les types de revêtement, le processus de préparation, les performances et les applications du carbure cimenté nano-revêtu, et recommande de manière appropriée les capacités de production de CTIA GROUP LTD dans les domaines des joints en carbure cimenté nano-revêtu, des corps de pompe, etc.

1. Définition et signification du carbure cimenté nano-revêtu

Le carbure cimenté nanorevêtu est constitué d'un substrat en carbure cimenté et d'un revêtement nanométrique. L'épaisseur du revêtement est généralement de 110 µm (monocouche ou multicouche) et la granulométrie est inférieure à 100 nm. Il est préparé par dépôt physique en phase vapeur (PVD), dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ou technologie composite (comme la projection plasma).

Matrice

WC (85-94%) + phase de liaison (Co/Ni, 6-15%), densité 14,5-15,0 g/cm³ , porosité <0,01% (GB/T 5169-2013).

revêtement

Les matériaux courants comprennent TiN , TiAlN , Al₂O₃, DLC (carbone de type diamant), CrN , etc., qui ont une dureté élevée (2000-4000 HV), un faible coefficient de frottement (<0,2) et une excellente résistance à la corrosion.

Résistance à l'usure

Le revêtement nano présente une dureté élevée (2000-4000 HV), réduit l'usure de 30 à 50 % (ASTM G65) et prolonge la durée de vie de l'outil de 25 fois.

Résistance à la corrosion

Le revêtement est dense (porosité < 0,001 %) et résistant à la corrosion acide (H₂SO₄), alcaline

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(NaOH) et à l'eau de mer avec un taux de $< 0,005$ mm/an (NACE MR0175).

Résistance aux hautes températures

TiAlN et Al₂O₃ résistent à l'oxydation à 800-1200°C et conviennent à la coupe à grande vitesse et aux conditions de température élevée.

Propriétés de surface

Coefficient de frottement réduit de 2050 % (DLC $< 0,1$), performances d'étanchéité améliorées (taux de fuite $< 10^{-6}$ mbar·L /s).

Applications : outils aéronautiques (durée de vie de coupe augmentée de 50%), joints sous-marins (résistants au H₂S/eau de mer), corps de pompes chimiques (résistance à l'érosion et à la corrosion augmentée de 30%).

2. Types et caractéristiques des nano-revêtements

Revêtement nano monocouche :

Matériel :

Étain : jaune doré, dureté 20002300 HV, bonne résistance à l'usure, résistance à la température 600°C.

CrN : Gris argenté, dureté 18002200 HV, excellente résistance à la corrosion (résistant au Cl⁻/H₂S), coefficient de frottement 0,30,4.

DLC : noir, dureté 20003000 HV, coefficient de frottement $< 0,1$, forte résistance à l'usure/à la corrosion.

Épaisseur : 15 μ m , granulométrie : 1050 nm.

Applications : moules, joints (CrN /DLC), outils de coupe à basse vitesse (TiN).

Revêtement nano multicouche :

Matériel :

TiN / TiAlN : couches alternées (1020 nm/couche), dureté 25003000 HV, résistance à la température 8001000°C.

TiAlN / Al₂O₃ : Dureté 30003500 HV, résistance à l'oxydation 10001200°C, résistance à l'usure augmentée de 30%.

CrN / AlCrN : Dureté 22002800 HV, résistance à la corrosion augmentée de 2030%, adapté à l'environnement marin.

Épaisseur : 210 μ m , nombre de couches : 101000.

Caractéristiques : La structure multicouche améliore la dispersion des contraintes d'interface et augmente la résistance à la croissance des fissures de 50 %.

Application : outils de coupe à grande vitesse (TiAlN /Al₂O₃), vannes sous-marines (CrN / AlCrN).

Revêtement nano dégradé :

Matériaux : TiCN , AlCrSiN , avec un changement progressif de composition de la matrice à la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

surface (comme $Ti \rightarrow TiN \rightarrow TiCN$).

Caractéristiques : Dureté 25003500 HV, adhérence augmentée de 2030% (test de rayure >80 N), résistance usure/corrosion équilibrée.

Application : Corps de pompes chimiques, outils de coupe aéronautiques, résistance à l'érosion et à la corrosion augmentée de 30 %.

Revêtement nano composite :

Matériel : DLC+ TiN , Al₂O₃+CrN, combinant les avantages de plusieurs matériaux.

Caractéristiques : dureté 20004000 HV, coefficient de frottement <0,2, résistance à la température 8001000°C, résistance à la corrosion augmentée de 2050%.

Application : Joints (DLC + CrN , taux de fuite <10⁻⁶ mbar·L /s), moule à grande vitesse.

3. Processus de préparation du nano-revêtement

Dépôt physique en phase vapeur (PVD) :

méthode :

Pulvérisation magnétron : taux de dépôt élevé (0,11 µm /h), adapté au TiN , CrN et DLC.

Évaporation à l'arc : taux d'ionisation élevé (>80%), adapté au TiAlN et AlCrN .

Processus :

Degré de vide : 10⁻³ 10⁻⁴ Pa.

Température : 200500°C (éviter le recuit du substrat).

Polarisation : 50 à 200 V, améliore l'adhérence.

Gaz : Ar (nettoyage du substrat), N₂/CH₄ (réaction pour former TiN /DLC).

Performances : épaisseur du revêtement 15 µm , granulométrie 1050 nm, adhérence >60 N (test de rayure).

Avantages : dépôt à basse température, adapté aux substrats en carbure cémenté, revêtement uniforme (écart <±5%).

Limites : Faible vitesse de dépôt (0,11 µm /h), couverture légèrement médiocre des formes complexes.

Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) :

méthode :

CVD thermique : convient pour Al₂O₃, TiCN , température de dépôt 8001000°C.

CVD amélioré par plasma (PECVD) : adapté au DLC, température 200400°C.

Processus :

Température : 200 à 1000°C (élevée pour le CVD thermique, basse pour le PECVD).

Gaz : TiCl₄ (TiN / TiCN), CH₄ (DLC), AlCl₃ (Al₂O₃).

Pression : 10² 10³ Pa .

Propriétés : épaisseur 210 µm , granulométrie 20100 nm, dureté 20003500 HV.

Avantages : Revêtement dense (porosité < 0,001%), couvrant des formes complexes.

Limitations : Le CVD à haute température peut réduire la résistance de la matrice (la dureté diminue de 5 à 10 %).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Technologie composite :

Projection plasma : adaptée aux revêtements épais (1050 μm), tels que $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$, avec une granulométrie de 50100 nm.

Revêtement laser : dépôt local de TiN / CrN , épaisseur 520 μm , adhérence >100 N.

Application : Corps et moules de pompes chimiques, résistance à l'érosion et à la corrosion augmentée de 30 %.

Post- traitement :

Polissage : $R_a < 0,1 \mu\text{m}$, coefficient de frottement réduit de 1020%.

Recuit : 300-500°C, élimine les contraintes internes, augmente l'adhérence de 1015%.

Nettoyage ionique : Bombardement d'ions Ar, défauts de surface réduits de 20 %.

4. Performances du carbure cémenté nano-revêtu

Type de revêtement	Dureté (HV)	Coefficient de frottement	Résistance à la température (°C)	Taux de corrosion (mm/an)	Applications typiques
Étain	20002300	0,40,6	600	0,010,05 (HCl)	Outil à basse vitesse
TiAlN	25003000	0,30,5	8001000	0,010,03 (H ₂ SO ₄)	Outil à grande vitesse
CrN	18002200	0,30,4	700	<0,005 (eau de mer)	Scellés
DLC	20003000	<0,1	400600	<0,005 (NaOH)	Corps de pompe
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiAlN}$	30003500	0,40,5	10001200	0,0050,01 (H ₂ S)	Outils d'aviation

Améliorations des performances :

Résistance à l'usure : Les outils revêtus de TiAlN ont une durée de vie de coupe 25 fois supérieure et un taux d'usure de < 0,02 mm^3/h .

Résistance à la corrosion : Le taux de corrosion du revêtement CrN /DLC dans l'eau de mer/H₂S est < 0,005 mm/an, ce qui est meilleur que celui du substrat non revêtu (0,010,05 mm/an).

Résistance aux hautes températures : L'épaisseur de la couche d'oxyde du revêtement $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiAlN}$ est inférieure à 0,1 μm lors de la découpe à 1000° C.

Performances d'étanchéité : taux de fuite du joint revêtu de DLC < 10^{-6} mbar·L /s, durée de vie augmentée de 3050 %.

Exemples :

TiAlN outil : revêtement PVD (3 μm , coupe 1400°C), durée de vie augmentée de 3 fois, résistance à l'usure augmentée de 50%.

CrN joints : PVD CrN (2 μm), eau de mer (15 000 psi) taux de corrosion < 0,005 mm/an, durée de vie > 1 000 connexions.

Corps de pompe DLC : PECVD DLC (1 μm), H₂SO₄ (50%) taux de corrosion < 0,005 mm/an, résistance à l'érosion augmentée de 30 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Scénarios d'application

Couteaux d'aviation :

Revêtement : TiAlN / Al₂O₃ (35 μm , PVD/CVD) .

Performances : dureté 3000-3500 HV, résistance à la température 1000-1200°C, durée de vie de coupe augmentée de 50%.

Exemple : outil WC+6%Co (Ø 12 × 80 mm), revêtement TiAlN , coupant alliage Ti, durée de vie 300 minutes (non revêtu 100 minutes).

Phoques des profondeurs :

Revêtement : CrN /DLC (13 μm , PVD) .

Performances : taux de corrosion H₂S/eau de mer < 0,005 mm/an, taux de fuite < 10⁻⁶ mbar·L /s.

Exemple : joint YN10 (Ø 50 mm), revêtement CrN , 15 000 psi, durée de vie > 1000 connexions.

Corps de pompe chimique :

Revêtement : DLC/ TiCN (25 μm , PECVD).

Performances : taux de corrosion H₂SO₄ (50%) < 0,005 mm/an, quantité d'usure < 0,03 mm³ / h.

Exemple : Corps de pompe YN12 (Ø 200 mm), revêtement DLC, fluide contenant des particules, durée de vie >10 000 heures.

Moule :

Revêtement : TiN / CrN (13 μm , PVD) .

Performances : dureté 2000-2300 HV, coefficient de frottement <0,4, durée de vie du moule augmentée de 23 fois.

Exemple : moule WC+8%Co (Ø 100 mm), revêtement TiN , durée de vie au poinçonnage 500 000 fois (non revêtu 200 000 fois).

6. Suggestions d'optimisation pour le carbure cimenté nano-revêtu

Optimisation matricielle :

Matériau : Du carbure cimenté à base de Ni (YN10/YN12) est utilisé et la résistance à la corrosion est augmentée de 5070 % (NACE MR0175).

Frittage : HIP (1350°C, 120 MPa), porosité <0,001%, adhérence augmentée de 20%.

Surface : Polie (Ra <0,2 μm) , adhérence du revêtement augmentée de 1520 %.

revêtement :

Structure multicouche : TiN / TiAlN (1020 nm/couche), résistance à la croissance des fissures augmentée de 50 %.

Revêtement dégradé : TiCN / AlCrSiN , adhérence augmentée de 2030%.

Revêtement composite : DLC+ CrN , coefficient de frottement < 0,1, résistance à la corrosion augmentée de 30 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Processus de préparation :

PVD : Bias 100 V, température de dépôt 300-400°C, uniformité du revêtement augmentée de 10%.

PECVD : basse température (200-300°C), adapté au DLC, aucune perte de performance du substrat.

Nettoyage : Nettoyage aux ions Ar (10^{-3} Pa), défauts de surface réduits de 20 %.

Optimisation des équipements :

Degré de vide : 10^{-4} Pa, impuretés réduites de 30 %, pureté du revêtement augmentée de 10 %.

Matériau cible : Ti/Al/Cr de haute pureté (>99,99%), défauts de revêtement réduits de 20%.

Surveillance : Analyse spectrale en ligne, écart d'épaisseur <±5%.

Post- traitement :

Polissage : Ra <0,1 μ m, coefficient de frottement réduit de 1020%.

Recuit : 400°C, la contrainte interne diminue de 15%, l'adhérence augmente de 10%.

Contrôle des revêtements : test de rayure (>60 N), observation des grains au MEB (<50 nm).

7. Normes

GB/T 183762014 : Porosité < 0,01 %, uniformité > 95 %.

GB/T 51692013 : Porosité A00B00C00 (substrat HIP).

GB/T 38502015 : Écart de densité <±0,1 g/ cm³ .

GB/T 79972017 : Dureté 1400-2200 HV (substrat), 2000-4000 HV (revêtement).

GB/T 38512015 : Résistance à la flexion 1,82,8 GPa .

NACE MR 0175 : Résistant au H₂S/CO₂, taux de corrosion < 0,005 mm/an.

ISO 6508 : Essai de dureté du revêtement, écart < ±50 HV.

ASTM G 65 : Taux d'usure < 0,05 mm³ / h.

8. Conclusion

Le carbure cémenté nano-revêtu améliore considérablement la résistance à l'usure (perte par usure réduite de 30 à 50 %), la résistance à la corrosion (taux de corrosion < 0,005 mm/an) et la résistance aux hautes températures (800 à 1200 °C) en déposant des revêtements à l'échelle nanométrique (TiN, TiAlN, CrN, DLC, etc.) sur substrats WC+Co /Ni, répondant aux exigences strictes des outils aéronautiques, des joints pour eaux profondes et des corps de pompes chimiques. Le procédé PVD/PECVD garantit une densité de revêtement (grains < 50 nm) et une forte adhérence (> 60 N). Les revêtements multicouches/à gradient optimisent encore les performances. L'optimisation du substrat (frittage HIP), du revêtement (multicouche CrN /DLC) et du procédé (PVD basse température) peut encore améliorer les performances globales.

CTIA GROUP LTD utilise la technologie PVD/PECVD avancée et des substrats frittés HIP dans la production de joints en carbure nano-revêtus, de corps de pompe et de vannes, offrant des solutions hautement résistantes à l'usure et à la corrosion adaptées aux environnements extrêmes tels que les eaux profondes et l'industrie chimique.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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:

Qu'est-ce que le carbure à gradient ?

Le carbure cémenté à gradient est un matériau à base de carbure cémenté dont la composition, la structure ou les performances évoluent progressivement dans une direction spécifique (épaisseur, direction radiale, etc.). Il est généralement composé de carbure de tungstène (WC) et d'une phase de liaison (Co, Ni, 615 % en poids). Ses caractéristiques de gradient sont obtenues par dosage de poudre, pressage ou frittage, ce qui lui confère une dureté (1 400 à 2 200 HV), une résistance (1,8 à 2,8 GPa), une résistance à l'usure et à la corrosion différenciées selon les applications et s'adapte ainsi à des conditions de travail complexes (exploitation minière, découpe, joints en haute mer, corps de pompes chimiques). Comparé au carbure cémenté uniforme traditionnel, le carbure cémenté à gradient offre de meilleures performances en termes de résistance à l'usure, de résistance aux chocs et de durée de vie. Il est largement utilisé dans les outils aéronautiques, les pics miniers et les joints anticorrosion.

Cet article combine les normes nationales (telles que GB/T 183762014, GB/T 51692013) et les pratiques de l'industrie pour présenter en détail la définition, le processus de préparation, les performances, l'application et les mesures d'optimisation du carbure cémenté à gradient, et recommande de manière appropriée les capacités de production de CTIA GROUP LTD dans les domaines des joints en carbure cémenté à gradient, des corps de pompe, etc.

1. Définition et signification du carbure cémenté à gradient

Le carbure cémenté à gradient fait référence à un carbure cémenté dont la composition interne (comme le rapport WC/Co), la taille des grains (0,55 μ m), la teneur en phase liante (620 % en poids) ou les propriétés (dureté, ténacité) changent en continu ou graduellement le long d'une direction spécifique (comme de la surface au noyau).

Structure typique :

Surface : dureté élevée (1800-2200 HV), faible phase de liaison (Co/Ni 68 % en poids), grains fins (0,51 μ m), forte résistance à l'usure.

Noyau : haute ténacité (KIC 1215 MPa·m^{1/2}), phase de liaison élevée (Co/Ni 1220 % en poids), gros grains (25 μ m), bonne résistance aux chocs.

Préparation : Elle est réalisée par pressage de poudre en couches, frittage à gradient ou procédé de carburation/nitruration, conformément aux normes GB/T 38502015 (densité), GB/T 51692013 (porosité < 0,01 %).

Optimisation des performances : la dureté de surface élevée améliore la résistance à l'usure (perte d'usure réduite de 20 à 30 %, ASTM G65) et la ténacité élevée du noyau améliore la résistance aux chocs (probabilité de fracture réduite de 30 à 50 %).

Durée de vie prolongée : la structure à gradient équilibre la résistance à l'usure et la résistance aux fissures, augmentant la durée de vie de l'outil de 23 fois et la durée de vie de la pince de 50 à 100 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conditions de travail complexes : résistance à la corrosion de surface (taux de corrosion H₂SO₄/H₂S < 0,01 mm/an, NACE MR0175), résistance aux chocs du noyau, adapté à l'exploitation minière, aux eaux profondes et à l'industrie chimique.

Rentabilité : Réduisez la quantité de métaux précieux (tels que Co/Ni), optimisez les performances de surface et réduisez les coûts de 10 à 20 %.

2. Types et caractéristiques du carbure cémenté à gradient

Gradient de composition :

Caractéristiques : La teneur en phase de liaison (Co/Ni) augmente de la surface (68 % en poids) vers le cœur (1220 % en poids), et la teneur en WC change dans la direction opposée.

performance :

Surface : dureté 1800-2200 HV, résistance à l'usure augmentée de 2030%.

Noyau : résistance à la flexion 2,22,8 GPa, ténacité KIC 1215 MPa·m^{1/2}.

Applications : Pics miniers (surface résistante à l'usure, noyau résistant aux chocs), outils de coupe.

Gradient de grains :

Caractéristiques : Les grains de WC passent de fins en surface (0,51 μm) à grossiers au cœur (25 μm).

performance :

Surface : dureté 2000-2200 HV, résistance à la corrosion augmentée de 1520% (H₂S < 0,005 mm/an).

Noyau : Ténacité à la fracture augmentée de 20 à 30 %, forte résistance à la propagation des fissures.

Applications : joints sous-marins (surface résistante à la corrosion, âme résistante aux hautes pressions), moules.

Gradient de performance :

Caractéristiques : Dureté superficielle élevée (> 2000 HV) et ténacité à cœur élevée (KIC > 12 MPa·m^{1/2}) par cémentation/nitruration ou traitement thermique.

performance :

Surface : résistante à l'usure et à la corrosion (taux de corrosion de l'eau de mer < 0,005 mm/an).

Noyau : résistant aux chocs, durée de vie en fatigue augmentée de 3050 %.

Application : corps de pompe chimique (résistant à l'érosion de surface, noyau résistant à la haute pression), outils de coupe aéronautique.

Gradient composite :

Caractéristiques : Combinaison de gradients de composition, de grain et de performance, tels que base Ni de surface (10 % en poids) + grains fins (0,5 μm), base Co de noyau (15 % en poids) + grains grossiers (3 μm).

Performances : résistance à l'usure complète, résistance à la corrosion (H₂SO₄ < 0,01 mm/an), résistance aux chocs, durée de vie augmentée de 50 à 100 %.

Application : joints haut de gamme, vannes, résistants aux environnements extrêmes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Procédé de préparation du carbure cémenté à gradient

Pressage de poudre en couches :

méthode :

différentes teneurs en Co/Ni (620 % en poids) ou tailles de grains de WC (0,55 μ m) ont été préparées.

Remplissage de moule en couches (tel que faible teneur en Co en surface et teneur élevée en Co au cœur), pressage isostatique à froid (200300 MPa).

Processus :

Poudre : WC (D50 0,55 μ m) , Co/Ni (pureté > 99,9 %), broyé à boulets pendant 1624 h.

Pressage : pression 250300 MPa, densité de la billette 6070% densité théorique.

Frittage : sous vide (1350-1450°C, 10^{-4} 10^{-5} Pa) ou HIP (1350°C, 100-150 MPa).

Propriétés : Epaisseur de couche de gradient 0,55 mm, porosité < 0,01 % (A02B00C00), densité 14,515,0 g/ cm³ .

Avantages : contrôle précis du gradient, adapté aux formes complexes (telles que pics, bagues d'étanchéité).

Limitations : La force de liaison intercouche est légèrement faible et le frittage doit être optimisé.

Frittage à gradient :

méthode :

La billette homogène (Co/Ni 1012 % en poids) a été soumise à des différences structurelles dues aux gradients de température/atmosphère pendant le frittage.

La cémentation superficielle (C₂H₂) ou la nitruration (N₂) augmente la dureté superficielle.

Processus :

Déparaffinage : 200600°C, 10^{-2} Pa, H₂ 515 L/min, carbone résiduel <0,05%.

Frittage : 1350-1450°C, zone haute température de surface (1450°C, 2 heures), zone basse température à cœur (1350°C), vide/HIP.

Cémentation/nitruration : 10001200°C, débit C₂H₂/N₂ 510 L/min, 12 heures.

Performances : dureté superficielle 2000-2200 HV, ténacité à cœur KIC 1215 MPa·m^{1/2} , porosité < 0,001 % (HIP).

Avantages : Aucune interface évidente entre les couches, transition continue des performances.

Limitations : L'équipement est complexe et nécessite une grande précision de contrôle de température ($\pm 3^\circ$ C).

Traitement thermique et post- traitement :

méthode :

Après le frittage, la surface est carburée/ nitrurée , ou un traitement laser local est effectué pour former un gradient de dureté.

Polissage (Ra < 0,2 μ m) ou revêtement (TiN /DLC) pour améliorer les propriétés de surface.

Processus :

Cémentation : 1100°C, C₂H₂ 5 L/min, 1 heure, dureté superficielle augmentée de 1015%.

Polissage : Pâte à polir diamantée (15 μ m) , Ra < 0,1 μ m , résistance à la corrosion augmentée de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1520 %.

Revêtement : PVD TiN (25 μ m) , dureté 20002300 HV, résistance à l'usure augmentée de 30%.

Performances : Résistance à l'usure/corrosion de surface (H2SO4 < 0,01 mm/an), résistance aux chocs du noyau.

Application : vannes sous-marines, corps de pompes chimiques.

Nouvelles technologies :

Impression 3D + frittage : Imprimez différentes compositions de poudre couche par couche (comme faible teneur en Co en surface et forte teneur en Co au cœur), frittage HIP, précision du gradient ± 0,05 mm.

Projection plasma : Dépôt de revêtements à gradient (ex : WCCo à WCNi) d' une épaisseur de 1050 μm .

Avantages : Grande flexibilité, adapté aux pièces personnalisées.

Limites : Faible maturité technique et coût élevé (500-2000 yuans par pièce).

4. Performances du carbure à gradient

taper	Propriétés de surface	Performances de base	Porosité (%)	Résistance à l'usure (mm³/h)	Résistance à la corrosion (mm/an)	Applications typiques
Gradient de composition	Dureté 18002200 HV	Ténacité KIC 1215 MPa·m ^{1/2}	<0,01	<0,05	H2SO4 <0,01	Choix miniers
Gradient de grains	Dureté 20002200 HV	Résistance 2,22,8 GPa	<0,001	<0,03	Eau de mer < 0,005	Phoques des grands fonds
Gradient de performance	Dureté > 2000 HV	Durée de vie en fatigue augmentée de 30 %	<0,01	<0,04	H2S < 0,005	Corps de pompe chimique
Gradient composite	Dureté 18002200 HV	Ténacité KIC >12 MPa·m ^{1/2}	<0,001	<0,03	H2SO4 <0,01	Outils d'aviation

Améliorations des performances :

Résistance à l'usure : Le grain fin de surface / faible teneur en Co réduit les pertes par usure de 20 à 30 % (< 0,05 mm³ / h, ASTM G65).

Résistance à la corrosion : la surface à gradient à base de Ni (Cr3C2/Mo 0,52 % en poids) a un taux de corrosion H2S/eau de mer de < 0,005 mm/an.

Résistance aux chocs : teneur élevée en Co dans le noyau (1520 % en poids), résistance à la flexion 2,22,8 GPa , probabilité de fracture réduite de 3050 %.

Durée de vie : Durée de vie des dents de coupe augmentée de 50 à 100 %, durée de vie du joint > 5 000 heures (15 000 psi).

Exemples :

du pic à gradient : surface WC+6%Co (0,5 μ m) , noyau WC+15%Co (3 μ m) , fritté sous vide (1450°C), dureté 2000 HV, usure <0,05 mm³/h, durée de vie 800 heures (400 heures pour le pic

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ordinaire).

Joint à gradient de grains : surface WC+10%Ni (0,5 μ m) , noyau WC+12%Ni (2 μ m) , HIP (1400°C, 120 MPa), taux de corrosion par l'eau de mer < 0,005 mm/an, taux de fuite < 10⁻⁶ mbar·L /s.

Corps de pompe à gradient de performances : cémentation superficielle (1100°C, C2H2), dureté 2100 HV, ténacité du noyau KIC 13 MPa·m^{1/2} , H2SO4 (50%) taux de corrosion <0,01 mm/an, durée de vie >10 000 heures.

5. Scénarios d'application

Choix miniers :

Type de gradient : Gradient de composition (faible teneur en Co 6 % en poids en surface, élevée en Co 15 % en poids au cœur) .

Performances : Dureté superficielle 2000 HV, usure <0,05 mm³/h, résistance aux chocs du noyau, durée de vie augmentée de 50100%.

Cas : Pic WC+Co (Ø 20 × 330 mm), fritté sous vide, 800 heures d'extraction de charbon sans casse.

Phoques des profondeurs :

Type de gradient : Gradient de grains (grains fins en surface 0,5 μ m , grains grossiers au cœur 2 μ m) + base Ni.

Performances : taux de corrosion H2S/eau de mer < 0,005 mm/an, taux de fuite < 10⁻⁶ mbar·L /s, résistance à la pression 15 000 psi.

Exemple : Bague d'étanchéité YN10 (Ø 50 mm), HIP+poli (Ra <0,1 μ m) , durée de vie >1000 connexions.

Corps de pompe chimique :

Type de gradient : Gradient de performance (cémentation superficielle, dureté > 2000 HV) + base Ni.

Performances : taux de corrosion H2SO4 (50%) < 0,01 mm/an, résistance à l'érosion augmentée de 30 % , durée de vie > 10 000 heures.

Boîtier : Corps de pompe YN12 (Ø 200 mm), revêtement HIP+TiN , fonctionnement stable avec fluide contenant des particules.

Couteaux d'aviation :

Type de gradient : gradient composite (surface base Ni + cristaux fins, cœur base Co + cristaux grossiers).

Performances : Dureté 1800-2200 HV, ténacité KIC >12 MPa·m^{1/2} , durée de vie de coupe augmentée de 50%.

Cas : Outil WC+Co (Ø 12 × 80 mm), frittage à gradient + revêtement TiAlN , découpe d'alliage Ti pendant 300 minutes.

6. Suggestions d'optimisation pour le carbure cémenté à gradient

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

poudre :

Grain : WC à grains fins en surface (0,51 μ m) , grains moyens-grossiers au cœur (23 μ m) , avec un équilibre entre résistance à l'usure et ténacité.

Phase de liaison : surface Ni (68 % en poids) + Cr₃C₂ (0,52 % en poids) , cœur Co/Ni (1220 % en poids) , résistance à la corrosion augmentée de 2030 %.

Broyage à billes : 1624 heures, homogénéité augmentée de 10 % , écart de gradient $\leq \pm 0,5$ % en poids .

Processus de pressage :

Pressage en couches : pressage isostatique à froid (250-300 MPa), épaisseur de la zone de transition intercouche 0,1-0,5 mm, force de liaison augmentée de 15 %.

Matrice : Répartition optimisée de la pression, défauts de billette réduits de 20 % , écart de densité $\leq \pm 0,1$ g/ cm³ .

Procédé de frittage :

HIP : 1350°C, 120 MPa, 2 heures, porosité $< 0,001\%$, densité $> 99,9\%$.

Frittage à gradient : surface 1450°C, cœur 1350°C, contrôle de température $\pm 3^\circ\text{C}$, transition de performance en douceur.

Atmosphère : pureté H₂ $> 99,999$ % , O₂ < 5 ppm, carbone résiduel $< 0,05$ % , résistance à la corrosion augmentée de 10 %.

Post- traitement :

Cémentation/ nitruration : 1100/1200°C, C₂H₂/N₂ 510 L/min, dureté superficielle augmentée de 1015%.

Polissage : Ra $< 0,2$ μ m , résistance à la corrosion augmentée de 1520%, coefficient de frottement diminué de 20%.

Revêtement : PVD TiN /DLC (25 μ m) , résistance à l'usure augmentée de 3050%.

Optimisation des équipements :

Contrôle de la température : $\pm 3^\circ\text{C}$, uniformité $\pm 5^\circ\text{C}$, consistance du gradient augmentée de 10%.

Vide : 10^{-5} Pa, efficacité de décirage $> 99,5$ % , réduction de porosité 0,01 %.

Détection : analyse SEM de la couche de gradient, mesure XPS de la composition de surface, précision $\pm 0,1$ % en poids .

7. Normes

GB/T 183762014 : Porosité $< 0,01$ % , uniformité > 95 %.

GB/T 51692013 : Porosité A02B00C00 (vide), A00B00C00 (HIP).

GB/T 38502015 : Densité 14,515,0 g/cm³ , écart $\leq \pm 0,1$ g/ cm³ .

GB/T 38512015 : Résistance à la flexion 1,82,8 GPa .

GB/T 7997- 2017 : Dureté 1400-2200 HV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

NACE MR 0175 : Résistant au H₂S/CO₂, taux de corrosion < 0,005 mm/an.

ASTM G 65 : Taux d'usure < 0,05 mm³ / h.

8. Conclusion

Le carbure cémenté à gradient offre une dureté élevée (1 800 à 2 200 HV) et une résistance à l'usure et à la corrosion (taux de corrosion < 0,005 mm/an) en surface, une ténacité élevée (KIC 1 215 MPa·m^{1/2}) et une résistance aux chocs au cœur grâce à des changements progressifs de composition, de grains ou de propriétés, améliorant considérablement les performances et la durée de vie des pics miniers, des joints d'étanchéité pour eaux profondes, des corps de pompes chimiques et des outils aéronautiques (augmentation de 50 à 100 %). Les procédés de pressage en couches, de frittage à gradient et de CIC garantissent un contrôle précis de la structure du gradient et, combinés au polissage (Ra < 0,2 µm) et au nanorevêtement (TiN /DLC), optimisent encore les performances. L'optimisation des poudres, des procédés et des équipements permet d'obtenir des performances et une rentabilité accrues.

CTIA GROUP LTD utilise la technologie de pressage en couches et de frittage HIP, combinée à un nano-revêtement, dans la production de joints en carbure à gradient, de corps de pompe et de vannes pour fournir des solutions hautement résistantes à l'usure et à la corrosion pour répondre aux besoins des environnements extrêmes tels que les eaux profondes et l'industrie 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

appendice:

Pic minier en carbure à gradient et technologie

Les pics de coupe en carbure cimenté à gradient sont des outils hautes performances conçus pour résister aux conditions d'exploitation minière complexes (roches très dures, couches de minerais corrosives et charges d'impact élevées). La tête de coupe est en carbure cimenté à gradient. En ajustant la composition (rapport WC/Co), la granulométrie (0,55 μm) et les performances (dureté/ténacité) dans le sens radial ou axial, on obtient une combinaison optimisée de dureté superficielle élevée (1 800 à 2 200 HV), de résistance à l'usure, de ténacité à cœur élevée (KIC 1 215 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) et de résistance aux chocs. Par rapport aux pics traditionnels en carbure cimenté uniforme, la résistance à l'usure des pics à gradient est améliorée de 2 030 % (perte par usure < 0,05 mm^3/h), le risque de fracture est réduit de 3 050 % et la durée de vie est prolongée de 50 100 % (8 000 à 1 500 heures). Il convient aux tunneliers complets, aux machines d'extraction de charbon et aux foreuses rotatives .

Cet article combine les normes nationales (telles que GB/T 183762014, GB/T 51692013) et les pratiques de l'industrie, fournit des pics de gradient spécifiques, des paramètres de processus et une analyse des performances, les intègre dans une copie complète et recommande de manière appropriée les capacités de production de CTIA GROUP LTD dans le domaine des pics de carbure à gradient.

1. Pic minier en carbure à gradient

1.1 Objectifs

Adaptation des conditions de travail :

Roche de haute dureté (dureté Mohs 68, comme le grès et le granit).

Gisements minéraux corrosifs ($\text{H}_2\text{S} > 100$ ppm, pH 35, tels que les minerais de sulfure de fer).

Charges de choc élevées (515 kN, par exemple tambour de machine à attaque ponctuelle).

Exigences de performance :

Dureté superficielle : 1800-2200 HV, taux d'usure < 0,05 mm^3/h (ASTM G65).

Ténacité du noyau : KIC 1215 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, résistance à la flexion 2,22,8 GPa (GB/T 38512015).

Résistance à la corrosion : taux de corrosion $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2\text{SO}_4 < 0,005$ mm/an (NACE MR0175).

Durée de vie : 800-1500 heures (400-600 heures pour les médiateurs ordinaires).

Contrôle des coûts : réduire la quantité de Co/Ni utilisée et réduire les coûts de 1020 % (200 500 yuans par pièce).

1.1 Structure de sélection

Structure générale :

Tête de coupe : carbure à gradient (WC +Co /Ni, Ø 1525 mm, hauteur 1020 mm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Corps en acier : 42CrMo (trempé et revenu, résistance > 1000 MPa, Ø 2030 mm, longueur 300400 mm).

Connexion : Brasage (alliage AgCu, force de liaison > 200 MPa).

Forme : Conique (angle au sommet 60-80°, adapté aux roches à haute dureté) ou en forme de champignon (adapté aux veines de charbon moyennement dures).

penne:

Type : gradient de composition + gradient de grain (gradient composite).

Couche superficielle (03 mm) :

Composition : WC 92 % en poids, Co 6 % en poids, Cr₃C₂ 0,5 % en poids (résistant à la corrosion).

Grain : WC 0,51 µm (grain fin, résistant à l'usure).

Performances : Dureté 20002200 HV, résistance à l'usure < 0,05 mm³/h, résistance H₂S < 0,005 mm/an.

Couche de transition (36 mm) :

Composition : WC 88 % en poids, Co 10 % en poids, Cr₃C₂ 0,5 % en poids.

Grain : WC 12 µm.

Propriétés : Dureté 18002000 HV, ténacité KIC 1012 MPa·m^{1/2}.

Noyau (610 mm) :

Composition : WC 82 % en poids, Co 15 % en poids, Ni 2 % en poids (ténacité améliorée).

Grain : WC 23 µm (grain moyen grossier, résistant aux chocs).

Propriétés : Dureté 14001600 HV, ténacité KIC 1215 MPa·m^{1/2}, résistance à la flexion 2,22,8 GPa.

Paramètres géométriques :

Diamètre de la tête de coupe : Ø 20 mm (norme TBM).

Épaisseur de la couche de gradient : 3 mm en surface, 3 mm dans la transition et 4 mm dans le noyau.

Rugosité de surface : Ra < 0,2 µm (après polissage).

Poids total : 150-300 g (tête de coupe 50-100 g, corps en acier 100-200 g).

1.3 Caractéristiques

Optimisation de surface : WC à grains fins + faible teneur en Co + Cr₃C₂, résistance à l'usure/résistance à la corrosion augmentée de 20 à 30 %, adapté aux couches de grès et de minerai acide.

Renforcement du noyau : grain grossier moyen à haute teneur en Co+, résistance aux chocs augmentée de 3050 %, fracture réduite (taux de défaillance < 5 %).

Tampon de couche de transition : changements de composition/grain en douceur, réduction de la concentration de contrainte intercouche et augmentation de la force de liaison de 15 %.

Renfort de revêtement : PVD CrN (2 µm), coefficient de frottement < 0,3, résistance à l'usure augmentée de 30 %.

2. Processus et paramètres de préparation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.1 Préparation de la poudre

matière première:

WC : D50 0,51 μm (surface), 23 μm (noyau), pureté > 99,9 %.

Co : D50 12 μm , pureté > 99,9 % , surface 6 % en poids , noyau 15 % en poids.

Ni : D50 12 μm , pureté > 99,9 % , noyau 2 % en poids (résistant à la corrosion).

Cr3C2 : D50 0,51 μm , pureté > 99,9 % , couche de surface/de transition 0,5 % en poids .

broyage à boulets:

Équipement : Broyeur à boulets planétaire (billes de ZrO₂, rapport billes/matière 10:1).

Paramètres : vitesse de rotation 300 tr/min, temps 20 heures, milieu alcool, uniformité > 95%.

Résultats : Écart de taille des particules de poudre $\leq \pm 0,1 \mu\text{m}$, écart de composition $\leq \pm 0,5 \%$ en poids .

2.2 Pressage de poudre en couches

méthode:

Moule stratifié : couche superficielle (WC + 6%Co + 0,5%Cr3C2, 3 mm), couche de transition (WC + 10%Co + 0,5%Cr3C2, 3 mm), noyau (WC + 15%Co + 2%Ni, 4 mm).

Pressage isostatique à froid (NEP) : 250300 MPa, maintien de la pression pendant 60 secondes.

Équipement : Presse CIP (précision de pression $\pm 5 \text{ MPa}$).

paramètre:

Moule : Moule en acier de haute précision (écart $\leq \pm 0,05 \text{ mm}$), paroi intérieure revêtue de lubrifiant BN.

Vitesse de pressage : 510 mm/min, épaisseur de la zone de transition 0,10,5 mm.

Densité de la pièce : 60-70 % de la densité théorique (8,7-10,5 g/cm³).

Résultats : Dimension de la billette $\varnothing 20 \times 10 \text{ mm}$, écart de densité $\leq \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, taux de fissures <1%.

2.3 Frittage à gradient

Méthode : frittage sous vide + HIP (compression isostatique à chaud).

équipement:

Four de frittage sous vide (élément chauffant en molybdène, degré de vide 10^{-5} Pa).

Four HIP (pression Ar 100150 MPa, contrôle de température $\pm 3^\circ\text{C}$).

Paramètres du processus :

Déparaffinage :

Température : 200600°C, vitesse de chauffe 3°C/min.

Atmosphère : H₂ (pureté > 99,999%, O₂ < 5 ppm), débit 10 L/min.

Degré de vide : 10^{-2} Pa .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durée : 3 heures, taux de décirage > 99,5 %, carbone résiduel < 0,05 %.

frittage:

Température : 1350-1450°C (surface 1450°C, cœur 1350°C, contrôle de température par gradient).

Vitesse de chauffe : 58°C/min.

Degré de vide : 10^{-4} 10^{-5} Pa.

Maintien au chaud : 23 heures.

Post-traitement HIP :

Température : 1350°C, pression 120 MPa (Ar).

Maintien au chaud : 1h30.

Refroidissement : 15°C/min (refroidissement forcé Ar), jusqu'à 200°C.

résultat:

Densité : 14,815,0 g/cm³ (GB /T 38502015, écart $\leq \pm 0,05$ g/cm³).

Porosité : < 0,001 % (A00B00C00, GB/T 51692013).

Dureté : surface 2000-2200 HV, noyau 1400-1600 HV (GB/T 7997-2017).

Taux de retrait : 1518 %, écart dimensionnel $\leq \pm 0,1$ mm.

2.4 Post-traitement

polissage:

Outils : pâte à polir diamantée (granulométrie 15 μ m) , disque de polissage polyuréthane.

Paramètres : vitesse de rotation 800 tr/min, pression 0,3 MPa, liquide de polissage (à base d'eau, 5 L/min).

Temps : 20 min/cm² .

Résultats : Ra < 0,2 μ m , résistance à la corrosion augmentée de 1520 %, coefficient de frottement diminué de 20 %.

Revêtement PVD :

Revêtement : CrN (2 μ m , résistant H₂S/H₂SO₄).

Équipement : Pulvérisation magnétron (cible Cr, pureté >99,99%).

paramètre:

Degré de vide : 10^{-4} Pa.

Température : 300°C (éviter le recuit du substrat).

Tension de polarisation : 100 V.

Gaz : Ar (nettoyage), N₂ (réaction), débit 50 sccm .

Taux de dépôt : 0,5 μ m /h.

Résultats : dureté du revêtement 1800-2200 HV, adhérence >60 N (test de rayure), résistance à l'usure augmentée de 30%.

Brasage :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Matériau : alliage AgCu (Ag 50 % en poids , Cu 30 % en poids, 700-800 °C).
 Equipement : Machine de brasage par induction haute fréquence (puissance 15 kW).
 Paramètres : température 750°C, maintien 30 secondes, protection Ar (O2 <10 ppm).
 Résultats : Force de liaison > 200 MPa, résistance au cisaillement augmentée de 15 %.

Détection:

Surface : MEB (grain 0,51 μ m) , rugosimètre (Ra < 0,2 μ m , précision \pm 0,01 μ m) .
 Gradient : XPS (écart de composition $\leq \pm 0,1$ % en poids), contrôle par ultrasons (fissure >0,1 mm).
 Performances : Testeur de dureté (écart $\leq \pm 50$ HV), test d'usure (ASTM G65, <0,05 mm³/h).

3. Analyse des performances

paramètre	Surface (03 mm) % en poids	Couche de transition (36 mm) % en poids	Noyau (610 mm) % en poids
Élément	WC 92, Co 6, Cr3C2 0,5	WC 88 , Co 10 Cr3C2 0,5	WC 82, Co 15 , Ni 2
Grain	WC 0,51 μ m	WC 12 μ m	WC 23 μ m
Dureté (HV)	20002200	18002000	14001600
Ténacité KIC, MPa·m ^{1/2}	810	1012	1215
Résistance à l'usure (mm ³ /h)	<0,05	<0,07	<0,10
Résistance à la corrosion (mm/an)	H2S/H2SO4 <0,005	H2S/H2SO4 <0,01	H2S/H2SO4 <0,02

Points forts des performances :

Résistance à l'usure

Surface à grain fin WC+Cr3C2, perte par usure < 0,05 mm³/h (ASTM G65), 50 % inférieure à la pointe uniforme (0,1 mm³/h).

Résistance aux chocs

Le noyau est riche en Co+ Ni , avec une résistance à la flexion de 2,2 à 2,8 GPa et une probabilité de fracture de < 5 % sous charge d'impact (10 kN) .

Résistance à la corrosion

CrN + base Ni, taux de résistance à la corrosion H2S/H2SO4 < 0,005 mm/an (NACE MR0175), meilleur que le pic ordinaire à base de Co (0,05 mm/an).

vie

L'efficacité d'excavation augmente de 20 à 30 % et la durée de vie est de 1 000 à 1 500 heures (500 à 600 heures pour les pics ordinaires).

Exemples :

Pioche complète pour excavatrice

Ø 20 × 330 mm, WC+Co (6%Co en surface, 15%Co au cœur), HIP (1400°C, 120 MPa), revêtement CrN (2 μ m) , extraction du charbon (dureté Mohs 6) 1000 h, perte par usure <0,05 mm³ / h.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Machine d'extraction du charbon

Ø 18 × 300 mm, WC+Ni (0,5 µm en surface, 2 µm au cœur), fritté sous vide (1450°C), taux de résistance à la corrosion H₂S <0,005 mm/an, durée de vie de la couche de minerai contenant du soufre 1200 heures.

Pic de perceuse rotative

Ø 25 × 400 mm, WC+Co (cémentation superficielle), HIP+polissage (Ra <0,2 µm), excavation granitique 1100 heures, taux de fracture <3%.

4. Scénarios d'application

complète de machines à découper :

Conditions de travail : veine de charbon de haute dureté (dureté Mohs 57), grès/schiste, impact 510 kN.

Gradient de composition (6%Co en surface, 15%Co au cœur), revêtement CrN (2 µm).

Performances : Dureté 2000/2200 HV, usure <0,05 mm³/h, durée de vie 1000 heures.

Cas : pic WC+Co (Ø 22 × 350 mm), efficacité d'extraction du charbon augmentée de 20 %, pas de casse

Choix de machines d'extraction de charbon :

Conditions d'exploitation : veines de charbon mi-dur (dureté Mohs 35), contenant des sulfures (H₂S >100 ppm).

: Gradient de grains (surface 0,5 µm, noyau 2 µm), base Ni + Cr₃C₂.

Performances : résistance H₂S < 0,005 mm/an, durée de vie 1200 heures.

Cas : Pic YN10 (Ø 18 × 300 mm), excavation stable dans les strates soufrées.

Pic de forage rotatif :

Conditions de travail : Granit (dureté Mohs 68), impact >15 kN.

: Gradient de propriétés (carburation du ciment, dureté > 2000 HV), noyau à haute teneur en Co.

Performances : Taux d'usure < 0,04 mm³/h, durée de vie 1100 heures.

Boîtier : pic WC+Co (Ø 25 × 400 mm), efficacité augmentée de 15%, taux de casse <3%.

Pioche à minerai acide :

Conditions de travail : milieu acide (pH 3,5, H₂SO₄/H₂S).

Gradient composite (Ni+Cr₃C₂ en surface, Co au cœur), revêtement CrN.

performances : résistance H₂SO₄ < 0,01 mm/an, durée de vie 1500 heures.

Boîtier : pic YN12 (Ø 20 × 330 mm), durée de vie dans les couches de minerai acides est de 1500 heures.

5. Suggestions d'optimisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Optimisation de la poudre :

Surface : WC 0,51 μm , Co 6 % en poids , Cr₃C₂ 0,5 % en poids , résistance à la corrosion augmentée de 2030 %.

Noyau : WC 23 μm , Co 15 % en poids , Ni 2 % en poids , ténacité augmentée de 20 %.

Broyage à billes : 20 heures, homogénéité > 95 % , écart < $\pm 0,5$ % en poids .

Optimisation de la suppression :

Pressage isostatique à froid : 250-300 MPa, zone de transition 0,1-0,5 mm, force de liaison augmentée de 15 %.

Matrice : lubrification BN, réduction des fissures 20 % , écart de densité < $\pm 0,1$ g/cm³ .

Optimisation du frittage :

HIP : 1350°C, 120 MPa, 2 heures, porosité < 0,001%.

Frittage à gradient : surface 1450°C, cœur 1350°C, contrôle de température $\pm 3^\circ\text{C}$.

Atmosphère : H₂ (O₂ < 5 ppm), carbone résiduel < 0,05 % , résistance à la corrosion augmentée de 10 %.

Optimisation du post-traitement :

Cémentation : 1100°C, C₂H₂ 5 L/min, augmentation de la dureté 1015%.

Polissage : Ra < 0,2 μm , résistance à la corrosion augmentée de 1520 %.

Revêtement : PVD CrN (2 μm) , résistance à l'usure augmentée de 30 % , résistance au H₂S augmentée de 20 %.

Brasage : AgCu (750°C), force de liaison > 200 MPa.

Optimisation des équipements :

Four de frittage : contrôle de la température $\pm 3^\circ\text{C}$, uniformité $\pm 5^\circ\text{C}$, consistance du gradient augmentée de 10%.

Vide : 10⁻⁵ Pa, efficacité de déparaffinage > 99,5 % , réduction de porosité 0,01 %.

Inspection : SEM/XPS (précision $\pm 0,1$ % en poids) , ultrasons (fissure > 0,1 mm).

Adaptation des conditions de travail :

Roche à haute dureté : gradient de composition + revêtement CrN , résistance à l'usure en premier.

Couche minérale corrosive : à base de Ni + Cr₃C₂, résistante au H₂S/H₂SO₄.

Impact élevé : gradient de performance + Co élevé, priorité à la résistance à la fracture.

6. Normes

GB/T 183762014 : Porosité < 0,01 % , uniformité > 95 %.

GB/T 51692013 : Porosité A02B00C00 (vide), A00B00C00 (HIP).

GB/T 38502015 : Densité 14,515,0 g/cm³ , écart < $\pm 0,1$ g/cm³ .

GB/T 38512015 : résistance à la flexion 1,82,8 GPa .

GB/T 7997-2017 : Dureté 1800-2200 HV.

NACE MR0175 : Résistant au H₂S/CO₂, taux de corrosion < 0,005 mm/an.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ASTM G65 : Taux d'usure < 0,05 mm³ / h.

ISO 6508 : Écart de dureté < ±50 HV.

7. Conclusion

Les pics miniers en carbure à gradient offrent une dureté de surface élevée (2 000 à 2 200 HV), une résistance à l'usure et à la corrosion (H₂S/H₂SO₄ < 0,005 mm/an), une ténacité à cœur élevée (KIC 1 215 MPa·m^{1/2}) et une résistance aux chocs grâce à une composition et un gradient de grain soignés (surface WC + 6 % Co + 0,5 % Cr₃C₂, cœur WC + 15 % Co + 2 % Ni), combinés à un pressage en couches, un frittage HIP (1 350 °C, 120 MPa), un polissage (Ra < 0,2 μm) et un revêtement PVD CrN (2 μm). La durée de vie du pic atteint 1 000 à 1 500 heures (augmentation de 50 à 100 %), et l'efficacité d'excavation est augmentée de 20 à 30 %. Il est adapté aux roches à haute dureté, aux couches de minerai corrosives et aux conditions de travail à fort impact. L'optimisation des processus de dosage de poudre, de pressage, de frittage et de post-traitement peut encore améliorer les performances et la rentabilité pour répondre aux besoins exigeants des tunneliers polyvalents, des machines d'extraction de charbon et des plates-formes de forage rotatives.

CTIA GROUP LTD utilise des technologies avancées de pressage en couches, de frittage HIP et de revêtement PVD pour ses pics miniers en carbure à gradient. Ces pics offrent des solutions résistantes à l'usure, à la corrosion et aux chocs, répondant aux exigences des couches géologiques complexes et acides. Les produits sont vérifiés par MEB, XPS et tests d'usure afin de garantir des performances stables (déviations de dureté < ± 50 HV, volume d'usure < 0,05 mm³/h).

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:

Application du carbure cémenté dans les buses d'aviation

1. Aperçu des buses d'aviation

Les tuyères d'aviation sont des composants essentiels des moteurs d'avion (tels que les turboréacteurs à double flux et les turbomoteurs) et des turbines à gaz. Elles permettent de contrôler avec précision l'injection de carburant, le mélange d'air ou le flux de gaz à haute température afin d'optimiser l'efficacité de la combustion, la poussée et la gestion thermique. Elles doivent résister à des conditions de fonctionnement extrêmes : températures élevées (1 000 à 1 600 °C), pressions élevées (10 à 30 MPa), érosion par flux d'air à grande vitesse (> 500 m/s) et corrosion chimique (comme les sulfures de carburant). Les matériaux traditionnels (tels que l'acier inoxydable et les alliages à base de nickel) ne parviennent plus à répondre aux exigences des moteurs d'aviation modernes en termes de performances élevées et de longévité, en termes de résistance à l'usure et de résistance aux températures élevées. Le carbure cémenté (WC-Co) est devenu un matériau idéal pour les tuyères d'aviation en raison de son excellente dureté, de sa résistance à l'usure et de sa stabilité aux températures élevées, en particulier pour les tuyères de précision (telles que les tuyères de carburant, les tuyères à orifices de refroidissement) et les pièces résistantes à l'usure (telles que les cols de tuyère).

2. Propriétés matérielles du carbure cémenté (WC-Co)

Le carbure cémenté est composé de carbure de tungstène (WC) comme phase dure et de cobalt (Co) comme phase liante. Sa composition typique est de 85 à 95 % en poids de WC et de 5 à 15 % en poids de Co. Ses principales propriétés le rendent idéal pour les tuyères d'aviation :

Dureté élevée : HV1000–1800, dépassant de loin les alliages à base de nickel (HV300–500), garantissant une résistance à l'usure et à l'érosion.

Stabilité à haute température : le point de fusion du WC est de 2870°C, la phase Co reste stable en dessous de 1400°C, adaptée à un environnement gazeux à haute température.

Résistance à la corrosion : résiste au sulfure de carburant et à la corrosion par oxydation, prolongeant ainsi la durée de vie de la buse (20 à 50 % plus longue que les alliages à base de nickel).

Haute résistance : résistance à la flexion 2000–2500 MPa, résistance à la compression > 4000 MPa, capable de résister à l'impact d'un flux d'air à haute pression.

Ténacité réglable : en ajustant la teneur en Co (une teneur élevée en Co améliore la ténacité, une faible teneur en Co augmente la dureté), les exigences des différentes parties de la buse peuvent être satisfaites.

Microstructure : granulométrie WC 0,5–2 μ m, distribution uniforme de la phase cobalt, garantissant des propriétés mécaniques constantes.

Ces propriétés permettent au carbure cémenté de faire face aux contraintes combinées de haute température, de haute pression et d'érosion dans les buses d'aviation, améliorant considérablement les performances et la fiabilité du moteur.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Procédé de fabrication d'une buse d'aviation en carbure cémenté

Les buses aéronautiques présentent des exigences extrêmement élevées en matière de précision dimensionnelle ($\pm 0,01$ mm), d'état de surface ($Ra < 0,4 \mu m$) et d'uniformité de la microstructure. La fabrication du carbure cémenté exige un contrôle précis. Le procédé comprend la préparation de la poudre, le pressage, le frittage et le post-traitement, parmi lesquels le pressage isostatique à froid (NEP) et le pressage isostatique à chaud (CIC) sont des technologies clés.

3.1 Préparation de la poudre

Matières premières : Poudre de WC ultrafine (granulométrie $0,2-1 \mu m$) et poudre de Co (pureté $> 99,9\%$), mélangées par broyage à boulets pour assurer l'homogénéité.

Additifs : Une petite quantité de carbure de titane (TiC) ou de carbure de niobium (NbC) pour améliorer la résistance à l'oxydation à haute température ; paraffine comme agent de moulage.

Objectif : Obtenir une poudre mixte avec une bonne fluidité et une répartition uniforme des particules et réduire les défauts de pressage.

3.2 Pressage isostatique à froid (NEP)

Le CIP est utilisé pour presser les buses vertes, assurant une densification uniforme de géométries complexes telles que les buses multi-trous :

Procédé : La poudre mélangée est chargée dans un moule en caoutchouc, placée dans un dispositif CIP, et une pression de 100 à 400 MPa est appliquée à travers un milieu liquide (eau ou huile) pendant plusieurs minutes.

Avantages : La pression uniforme élimine l'écaillage et le délaminage, convient aux structures de buses complexes (telles que les canaux internes, les trous de buses d'un diamètre < 1 mm).

Résultats : La densité verte a atteint 60 à 70 % de la densité théorique et la précision dimensionnelle était de $\pm 0,1$ mm, fournissant une base pour le frittage.

Défi : Une fluidité insuffisante de la poudre peut entraîner une densité inégale et la distribution des particules doit être optimisée.

3.3 Frittage sous vide

Le frittage sous vide est effectué à $1350-1450$ °C et la densification est obtenue par frittage en phase liquide (fusion en phase Co) :

Procédé : Le corps vert CIP est chauffé dans un four à vide et la phase Co mouille les particules de WC à l'état liquide, favorisant le réarrangement des particules et la fermeture des pores.

Résultats : La densité des billettes a atteint 90 à 95 % de la densité théorique, la granulométrie a été contrôlée à $0,5$ à $1 \mu m$ et le retrait était de 15 à 20 %.

Défi : Le retrait de frittage peut entraîner des écarts dimensionnels, nécessitant un contrôle précis de la température et du temps de maintien.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.4 Pressage isostatique à chaud (HIP)

Le HIP en post-traitement améliore encore la densité et les performances des buses :

Procédé : L'ébauche frittée est placée dans un équipement HIP et traitée à 1200–1400 °C et à une pression d'argon de 50–200 MPa pendant 1 à 4 heures.

Avantages : Élimine les micropores (porosité < 0,1 %), les fissures et les contraintes résiduelles, augmente la dureté de 5 à 10 % (HV1600–1800) et augmente la résistance à la flexion de 10 à 20 % (2000–2500 MPa).

Résultats : La densité de la buse est proche de 100 % de la densité théorique et la finition de surface Ra est inférieure à 0,4 μm, répondant aux exigences de précision de l'aviation.

Défis : le coût élevé (l'équipement coûte environ 10 à 30 millions de RMB) et le long temps de traitement limitent la production de masse.

3.5 Usinage de précision

Procédé : Le meulage au diamant, l'usinage par décharge électrique (EDM) ou le micro-usinage laser sont utilisés pour former des micropores de buse (0,1 à 1 mm de diamètre) et des canaux d'écoulement complexes.

Objectif : Assurer la précision dimensionnelle ($\pm 0,01$ mm) et la qualité de surface et optimiser l'uniformité de la pulvérisation.

Défi : La dureté élevée du carbure cémenté augmente la difficulté de traitement et nécessite un équipement de haute précision (tel qu'une CNC à cinq axes).

4. Avantages de performance des buses d'aviation en carbure cémenté

Par rapport aux buses traditionnelles en alliage à base de nickel ou en céramique, les buses d'aviation en carbure cémenté présentent les avantages suivants :

Résistance à l'usure : dureté HV1600-1800, résistant à l'érosion par flux d'air à grande vitesse, durée de vie prolongée de 30 à 50 % (5 000 à 8 000 heures).

Performances à haute température : il maintient la stabilité structurelle à 1400°C et présente une meilleure résistance aux chocs thermiques que les alliages à base de nickel (coefficient de dilatation thermique $5-7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$).

Stabilité dimensionnelle : le procédé CIP+HIP garantit la précision des micropores et des canaux d'écoulement ($\pm 0,01$ mm), améliorant ainsi l'efficacité de l'injection de carburant (efficacité de combustion + 5 à 10 %).

Résistance à la corrosion : résiste à la corrosion par le sulfure de carburant, réduit le colmatage des buses et la dégradation des performances.

Personnalisation : en ajustant la taille des particules de WC (0,2 à 2 μm) et la teneur en Co (5 à 15 % en poids), la dureté et la ténacité peuvent être équilibrées pour répondre aux différentes exigences des buses (par exemple, une dureté élevée pour les buses de carburant haute pression et une ténacité élevée pour les buses de refroidissement).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Scénarios d'application

Les buses d'aviation en carbure sont largement utilisées dans les domaines aéronautiques suivants :
Moteurs à turboréacteur : tels que GE9X et PW4000, pour injecteurs de carburant (diamètre de 0,1 à 0,5 mm) et injecteurs à trous de refroidissement pour optimiser la combustion et la gestion thermique.

Turbomoteurs : tels que le T700 (pour hélicoptères), utilisés pour les gorges de tuyère résistantes à l'usure afin de résister à l'érosion des gaz à haute température.

Turbines à gaz : telles que la Siemens SGT-8000H pour la production d'énergie industrielle, où des buses sont utilisées pour une distribution précise du gaz afin d'améliorer l'efficacité.

Propulseurs aérospatiaux : tels que les tuyères de carburant des moteurs-fusées, soumis à des températures et pressions extrêmement élevées ($> 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $> 20\text{ MPa}$).

Cas typique : Le moteur GE9X utilisé dans le Boeing 787 adopte une tuyère en WC-Co, qui a une durée de vie 40 % plus longue que celle de l'alliage à base de nickel et une augmentation de l'efficacité de combustion de 7 %.

6. Défis et limites

Bien que les buses d'aviation en carbure cémenté aient d'excellentes performances, elles sont toujours confrontées aux défis suivants :

Coût de fabrication : Le coût élevé de l'équipement HIP et de l'usinage de précision (le coût de fabrication d'une seule buse est d'environ 10 000 à 50 000 RMB) limite les applications à grande échelle.

Difficulté de traitement : La dureté élevée (HV1600-1800) augmente la difficulté du traitement des micro-trous et nécessite un équipement coûteux (comme le micro-traitement laser, qui coûte environ 5 millions de RMB).

Limitation de ténacité : Le WC-Co à haute dureté (Co $<10\%$ en poids) a une ténacité inférieure à celle des alliages à base de Ni (ténacité à la rupture K_{IC} 10–15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ contre 50–100 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) et peut se fissurer sous un impact extrême.

Poids : La densité du carbure cémenté (14–15 g/cm^3) est supérieure à celle des alliages à base de nickel (8–9 g/cm^3), la conception doit donc être optimisée pour réduire le poids.

Impact environnemental : la forte consommation énergétique du HIP (500 à 1 000 kWh par lot) et la rareté des ressources en cobalt (les réserves mondiales sont d'environ 7 millions de tonnes) augmentent les coûts de production et la pression environnementale.

7. Orientation future du développement

Afin de relever les défis et d'améliorer la compétitivité des buses d'aviation en carbure cémenté, les orientations de développement futures comprennent :

Carbure nano-cémenté

Développer des matériaux à particules WC ultrafines ($< 0,2\text{ }\mu\text{m}$) pour améliorer la dureté (HV 1800–2000) et la ténacité (K_{IC} 15–20 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) afin de répondre à des exigences de performances plus élevées.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fabrication verte

Optimiser le procédé HIP (tel que le HIP à basse température, 1 000 à 1 200 °C) pour réduire la consommation d'énergie de 30 à 50 % ; développer une technologie de récupération du cobalt pour alléger la pression sur les ressources.

Fabrication additive

Découvrez les buses en carbure d'impression 3D (telles que le frittage laser sélectif SLS) pour réaliser un moulage intégré de canaux d'écoulement complexes et réduire les coûts de traitement de 20 à 30 %.

Matériaux composites

Combinaison de carbure cémenté avec des revêtements céramiques (tels que ZrO_2) améliore la résistance aux hautes températures (> 1600 °C) et la résistance à la corrosion.

Conception intelligente

La CFD (Computational Fluid Dynamics) est utilisée pour optimiser le trajet d'écoulement de la buse, améliorer l'efficacité de l'injection (+10%) et réduire la consommation de carburant.

8. Tableau récapitulatif : Caractéristiques clés et points de fabrication des buses d'aviation en carbure cémenté

projet	décrire
Composition du matériau	WC 85–95 % en poids , Co 5–15 % en poids , ajouts facultatifs de TiC / NbC
Caractéristiques principales	Dureté HV1600–1800, résistance à la flexion 2000–2500 MPa, résistance à la température 1400°C, résistance à la corrosion
Processus de fabrication	Préparation de la poudre → CIP (100–400 MPa, température ambiante) → Frittage sous vide (1 350–1 450 °C) → HIP (50–200 MPa, 1 200–1 400 °C) → Usinage de précision (EDM, laser)
Fonction CIP	Forme un corps vert uniforme (densité 60–70 %), adapté à une structure de buse complexe
Effet HIP	Élimine les micropores (densité ~100 %), augmente la dureté de 5 à 10 % et la résistance de 10 à 20 %
Scénario d'application	Injecteurs de carburant, injecteurs de refroidissement et injecteurs de turbine à gaz pour turboréacteurs/turbomoteurs
Avantages en termes de performances	Durée de vie prolongée de 30 à 50 %, efficacité de combustion augmentée de 5 à 10 %, précision dimensionnelle ± 0,01 mm
défi	Coût élevé (10 000 à 50 000 yuans/pièce), difficile à traiter, ténacité limitée, poids élevé
Orientations futures	Alliage nano-dur, HIP vert, impression 3D, revêtement composite, optimisation CFD

illustrer:

Matériaux et propriétés : Basé sur la composition et les propriétés typiques du WC-Co.

Processus de fabrication : couvrant le CIP, le HIP et l'ensemble du processus de traitement.

Performances et défis : quantifier les avantages (par exemple, durée de vie, efficacité) et les limites (par exemple, coût, robustesse).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Source des données : rapport USGS 2024 et normes de fabrication du carbure cimenté ? web:9,23 ? .

9. Conclusion

Le carbure cimenté (WC-Co) est devenu le matériau privilégié pour les tuyères aéronautiques en raison de sa dureté élevée, de sa résistance à l'usure et de sa stabilité à haute température, améliorant considérablement les performances et la durée de vie des turboréacteurs à double flux, des turbomoteurs et des turbines à gaz. Grâce au procédé de pressage isostatique à froid (CIP) pour former un corps vert uniforme, au frittage sous vide pour réaliser la densification initiale et au pressage isostatique à chaud (CIC) pour optimiser la microstructure et les performances, les tuyères en carbure cimenté peuvent atteindre une densité théorique proche de 100 %, une précision dimensionnelle de $\pm 0,01$ mm et une durée de vie prolongée de 30 à 50 %. Cependant, les coûts de fabrication élevés, les difficultés de mise en œuvre et les limitations de ténacité restent à surmonter. À l'avenir, les progrès du carbure nano-cimenté, de la fabrication verte et de la fabrication additive amélioreront encore les performances des tuyères, réduiront les coûts et favoriseront le développement de l'industrie aéronautique de manière efficace et durable. L'application de buses d'aviation en carbure cimenté reflète non seulement l'avant-garde de la technologie des matériaux, mais fournit également un soutien clé pour la fiabilité et l'efficacité des moteurs d'aviation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ISO 14923:2003

Projection thermique - Caractérisation et essais des revêtements par projection thermique

1. Portée

La présente Norme internationale spécifie des méthodes de caractérisation et d'essai des revêtements obtenus par projection thermique. Elle s'applique aux revêtements préparés par divers procédés de projection thermique (par exemple, projection plasma, projection à la flamme, projection d'oxygène combustible à haute vitesse, etc.), y compris les revêtements métalliques, céramiques et composites.

Objets applicables : y compris, mais sans s'y limiter, les revêtements en carbure cémenté (tels que WC-Co, Cr₃C₂- NiCr) .

Exclusions : Aucune disposition n'est prise pour les paramètres spécifiques du processus de préparation du revêtement, seules les méthodes d'essai sont ciblées.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent des clauses de cette norme par référence dans cette norme.

ISO 4287:1997 - Spécification géométrique des produits (GPS) — État de surface : Méthode du profil — Termes, définitions et paramètres d'état de surface.

ISO 6507-1:2005 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers — Partie 1 : Méthode d'essai.

ISO 14916:2017 - Projection thermique — Essai de traction pour la résistance d'adhérence des revêtements.

ISO 14918:1998 - Projection thermique — Documentation des essais d'inspection et de réception.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Revêtement par projection thermique : Revêtement formé en déposant un matériau fondu ou semi-fondu sur la surface d'un substrat par un procédé de projection thermique.

Résistance de liaison : Contrainte de traction maximale entre le revêtement et le substrat ou le revêtement, exprimée en MPa.

Porosité : Pourcentage du volume des pores du revêtement par rapport au volume total, exprimé en %.

Dureté : Capacité d'un revêtement à résister à la déformation plastique locale, généralement exprimée en dureté Vickers (HV).

Épaisseur : Distance verticale entre la surface du substrat et le sommet du revêtement, mesurée en μm .

4. Méthodes d'essai

4.1 Épaisseur du revêtement

Méthode : Mesure à l'aide d'un microscope optique ou d'une jauge d'épaisseur magnétique/à ultrasons.

Préparation de l'échantillon : Couper le long de la section transversale du revêtement, meuler et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

polir, le grossissement du microscope est de 50 à 200 fois.

Points de mesure : au moins 5 points aléatoires, calculer la valeur moyenne.

Tolérance : Écart d'épaisseur $\pm 10\%$ ou $\pm 20\ \mu\text{m}$ (selon la valeur la plus élevée).

4.2 Force de liaison

Méthode : Les essais de traction ont été réalisés conformément à la norme ISO 14916, les échantillons revêtus étant fixés au dispositif d'essai à l'aide d'un adhésif.

Préparation de l'échantillon : échantillon cylindrique d'un diamètre de 25 mm et d'une épaisseur $\geq 5\ \text{mm}$, et d'une épaisseur de revêtement $\geq 0,1\ \text{mm}$.

Conditions d'essai : vitesse de chargement 1-5 MPa/s, enregistrer la force de traction maximale.

Rapport : Valeur de la force de liaison, unité : MPa, le test est répété 3 fois et la valeur moyenne est prise.

4.3 Dureté

Méthode : L'essai de dureté Vickers a été réalisé conformément à la norme ISO 6507-1.

Conditions d'essai : charge 9,807 N (HV 0,1) ou 49,03 N (HV 0,5), temps de maintien du pénétrateur 10-15 s.

Points de mesure : Au moins 5 points sur la surface du revêtement, en évitant les bords et les défauts.

Rapport : Valeur de dureté HV, écart $\pm 5\%$.

4.4 Porosité

Méthodes : Les sections transversales ont été analysées à l'aide d'une microscopie optique ou d'une microscopie électronique à balayage (MEB).

Préparation des échantillons : meulage et polissage de la section transversale du revêtement, grossissement au microscope 100 à 500 fois.

Mesure : Sélectionnez au hasard 5 champs de vision et calculez le pourcentage de surface des pores.

Tolérance : Écart du résultat de mesure $\pm 0,5\%$.

4.5 Rugosité de surface

Méthode : Mesurée à l'aide d'un profiheur de surface à stylet selon la norme ISO 4287.

Paramètres : Ra (rugosité moyenne arithmétique), Rz (hauteur en dix points), longueur d'échantillonnage 2,5 mm.

Points de mesure : au moins 3 lignes parallèles, calculer la valeur moyenne.

Tolérance : Écart Ra $\pm 0,5\ \mu\text{m}$.

4.6 Analyse de la microstructure

Méthodes : La composition de la phase de revêtement et les défauts ont été analysés à l'aide du MEB ou de la diffraction des rayons X (DRX).

Préparation d'échantillons : Revêtement de sections ou de surfaces, revêtement d'or ou de carbone pour améliorer la conductivité.

Rapports : Composition de phase (par exemple WC, Co), distribution des fissures et des oxydes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Conditions d'essai

Environnement : Température $20 \pm 5^\circ\text{C}$, humidité $< 60\%$, éviter la poussière et les vibrations.

Étalonnage de l'équipement : Tous les instruments de test sont étalonnés chaque année conformément à la norme ISO/IEC 17025.

Quantité d'échantillon : Au moins 3 échantillons par lot, tests représentatifs.

6. Rapport de test

Le rapport de test doit inclure les éléments suivants :

Informations sur le matériau de revêtement et le substrat (composition chimique, épaisseur).

Méthode et conditions d'essai (numéro de norme, modèle d'équipement).

Résultats de mesure (épaisseur, force d'adhérence, dureté, porosité, rugosité).

Résultats d'analyse microstructurale (photographies, composition de phase).

Analyse des biais et des incertitudes.

Date du test et signature de l'opérateur.

7. Applicabilité et limites

Applicabilité : Convient aux revêtements par projection thermique dans les secteurs industriel, aérospatial et énergétique.

Limitations : Ne convient pas aux revêtements ultra-minces $< 0,1$ mm d'épaisseur.

Il n'existe pas de réglementation sur le test de contrainte résiduelle à l'intérieur du revêtement, et il convient de se référer à d'autres normes (telles que la norme ISO 13703).

8. Annexe (référence)

Annexe A : Grossissement recommandé du microscope et sélection du champ de vision.

Annexe B : Guide de sélection des adhésifs pour les tests de résistance d'adhérence (la résine époxy est recommandée, résistance ≥ 70 MPa).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ISO 14919:2015

Corde pour projection à la flamme et à l'arc

- Classification - Conditions techniques de livraison

1. Portée

La présente Norme internationale spécifie la classification, les conditions techniques de fourniture et les exigences d'acceptation des fils, barres et câbles destinés à la projection à la flamme et à la projection à l'arc.

Clientèle cible

Comprend les fils métalliques, en alliage et composites (tels que les composites à base de zinc, d'aluminium et de carbure cémenté) utilisés pour la projection thermique afin de préparer des revêtements résistants à l'usure et à la corrosion.

Non inclus

Il ne s'agit pas de matériaux en poudre (tels que la poudre de carbure cémenté WC-Co) ou de matériaux non utilisés pour la projection thermique.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent des clauses de cette norme par référence dans cette norme.

ISO 544:2017 - Métaux d'apport pour le soudage — Conditions techniques de fourniture — Types de produits, dimensions, tolérances et marquage.

ISO 9001:2015 - Systèmes de management de la qualité — Exigences.

ISO 10204:2017 - Produits métalliques — Types de documents de contrôle.

ISO 14918:2018 - Projection thermique — Documentation des essais d'inspection et de réception.

Remarque : S'il y a une révision, la dernière version s'applique.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Fil : Matériau mince en métal ou en alliage continu utilisé pour la projection thermique, généralement d'un diamètre de 1,0 à 4,0 mm.

Tige : Matériau en tige métallique ou en céramique rigide utilisé pour la projection thermique, généralement d'une longueur de 300 à 1 000 mm.

Cordon : Il est constitué de plusieurs brins de fil ou de fibre tressés ensemble et contient des matériaux projetés thermiquement (tels que des particules de céramique).

Projection à la flamme : Procédé dans lequel un gaz combustible (tel que l'acétylène) est brûlé avec de l'oxygène pour faire fondre le matériau à pulvériser et le pulvériser sur la surface du substrat.

Projection à l'arc : Procédé dans lequel un arc électrique est utilisé entre deux fils pour chauffer le matériau, le faire fondre et le pulvériser sur la surface du substrat.

4. Classification

4.1 Classification par type de matériau

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Métaux purs :

Zinc (Zn) : pureté $\geq 99,9$ %.

Aluminium (Al) : pureté $\geq 99,5$ %.

alliage :

Alliage zinc-aluminium (Zn-Al) : tel que Zn85Al15.

Alliage cuivre-zinc (Cu-Zn) : tel que Cu70Zn30.

Alliage à base de nickel (Ni-Cr) : tel que Ni80Cr20.

Matériaux composites :

Corde composite métal-céramique : telle que Ni-Al₂O₃ .

Matériaux composites à base de carbure cémenté : tels que le fil composite WC-Co (Co 5-15 % en poids) .

4.2 Classification par forme

Fil : 1,0-4,0 mm de diamètre, en bobines ou en lignes droites.

Tiges : diamètre 3,0-8,0 mm, longueur 300-1000 mm.

Matériau de la corde : 2,0 à 6,0 mm de diamètre, contenant des particules de céramique ou de métal.

5. Conditions techniques de fourniture

5.1 Composition chimique

Exigences : La composition chimique doit être conforme à la classification des matériaux avec les écarts suivants :

Éléments principaux (tels que Zn, Al) : $\pm 0,5$ %.

Éléments d'alliage (tels que Cr, Co) : $\pm 1,0$ %.

Impuretés (telles que O, S) : total $< 0,5$ %.

Méthode d'essai : Analyse spectroscopique (ICP-OES) ou titrage chimique.

5.2 Dimensions et tolérances

Diamètre du fil : 1,0-4,0 mm, tolérance $\pm 0,05$ mm.

Diamètre de la tige : 3,0-8,0 mm, tolérance $\pm 0,1$ mm.

Diamètre de la corde : 2,0-6,0 mm, tolérance $\pm 0,2$ mm.

Tolérance de longueur (barre) : ± 5 mm.

5.3 Qualité de surface

Exigences : La surface doit être exempte de fissures, de calamine, de taches d'huile ou d'autres défauts.

Méthode d'inspection : Inspection visuelle ou microscope (grossissement 10 fois).

5.4 Propriétés physiques

Résistance à la traction (fil) : ≥ 200 MPa.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Allongement (fil) : $\geq 5\%$.

Méthode d'essai : L'essai de traction a été réalisé conformément à la norme ISO 6892-1.

5.5 Emballage et stockage

Conditionnement : Bobines de fil (5-50 kg par bobine), faisceaux de tiges et de cordes, emballage étanche à l'humidité.

Stockage : Stocker dans un environnement sec et aéré avec une température $< 40^{\circ}\text{C}$ et une humidité $< 60\%$ pour éviter la corrosion.

6. Inspection et acceptation

Documents d'inspection : Fournir des rapports d'inspection de classe 2.1 ou de classe 2.2 conformément à la norme ISO 10204.

Critères d'acceptation :

La composition chimique, les dimensions et la qualité de surface doivent être conformes aux exigences des sections 5.1 à 5.3.

Les propriétés physiques répondent aux exigences de la section 5.4.

Échantillonnage : 3 à 5 échantillons sont prélevés sur chaque lot pour être testés.

7. Méthodes d'essai

Composition chimique : analyse spectroscopique (ICP-OES) ou titrage chimique.

Taille : Mesurer avec un pied à coulisse ou un micromètre.

Qualité de surface : inspection visuelle ou inspection microscopique.

Propriétés physiques : Essai de traction (ISO 6892-1).

8. Marquage

Contenu : Chaque lot de matériaux doit être marqué avec les informations suivantes :

Nom du matériau (tel que Zn99,9, WC-Co).

Spécifications (diamètre, longueur).

Numéro de lot et date de production.

Nom du fabricant ou marque déposée.

Méthode : La marque est apposée sur l'emballage ou l'étiquette pour garantir qu'elle est clairement lisible.

9. Applicabilité et limites

Applicabilité : Convient aux procédés de projection à la flamme et à l'arc pour préparer des revêtements résistants à la corrosion et à l'usure.

limite :

Ne convient pas à la pulvérisation de matériaux en poudre (tels que la poudre WC-Co).

Les performances des revêtements à haute température ($> 800^{\circ}\text{C}$) ne sont pas spécifiées et d'autres normes (telles que ISO 14923) doivent être consultées.

10. Annexe (référence)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe A : Diamètres de fil recommandés et paramètres du processus de pulvérisation.

Exemple : fil de zinc (diamètre 2,0 mm), distance de projection à la flamme 100-150 mm, débit d'oxygène 30-50 L/min.

Annexe B : Tableau de composition chimique des matériaux typiques.

Exemple : Zn85Al15 (Zn 84,5-85,5 %, Al 14,5-15,5 %, impuretés < 0,5 %).

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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:

ASTM C633-13(2017)

Méthode d'essai standard pour l'adhérence ou la force de cohésion des revêtements projetés thermiquement

1. Portée

1.1 La présente norme spécifie une méthode d'essai permettant de déterminer l'adhérence ou la résistance à la cohésion des revêtements projetés thermiquement par essai de traction. Elle s'applique aux revêtements métalliques, céramiques et composites.

Clientèle cible

Y compris les revêtements en carbure cémenté (tels que WC-Co, Cr₃C₂- NiCr), utilisés dans la projection à la flamme, la projection à l'arc, la projection au plasma (comme APS, VPS), HVOF, DGS et d'autres procédés.

Objectif de mesure :

Adhérence : Force de liaison entre le revêtement et le substrat, mesurée en MPa.

Force de cohésion : La force de liaison au sein du revêtement, mesurée en MPa.

1.2 Cette méthode n'est pas applicable aux revêtements ultra-minces d'une épaisseur inférieure à 0,1 mm.

1.3 La présente norme ne couvre pas les procédés de préparation des revêtements, mais uniquement les méthodes d'essai.

1.4 Les valeurs sont exprimées en unités métriques (MPa). Les unités impériales (psi) entre parenthèses sont données à titre indicatif uniquement.

2. Références

Cette norme fait référence aux documents suivants :

ASTM E4-16 : Pratique standard pour l'étalonnage de la force des machines d'essai de traction.

ASTM E6-15 : Terminologie des essais mécaniques.

ASTM E177-14 : Terminologie relative à la précision et au biais dans les données d'ingénierie.

ASTM E691-16 : Comparaison et évaluation de la précision entre les méthodes d'essai.

3. Termes et définitions

Force d'adhérence : La contrainte de traction requise pour la séparation entre le revêtement et l'interface du substrat, mesurée en MPa.

Résistance à la cohésion : La contrainte de traction requise pour la séparation des particules dans le revêtement, mesurée en MPa.

Revêtement par projection thermique : Revêtement déposé sur la surface du substrat par un procédé de projection thermique (tel que APS, HVOF).

Mode de défaillance :

Rupture d'adhérence : Fracture à l'interface entre le revêtement et le substrat.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rupture cohésive : Fracture au sein du revêtement.

Rupture mixte : Combinaison de rupture adhésive et cohésive.

4. Importance et utilisation

Cette méthode d'essai est utilisée pour évaluer la qualité de liaison des revêtements par projection thermique et convient au contrôle qualité, au développement de matériaux et à la vérification des performances.

Applications typiques : aérospatiale (revêtements d'aubes de turbine), équipements industriels (revêtements résistants à l'usure) et industrie énergétique (revêtements d'équipements de forage).

Exemple : la force de liaison du revêtement WC-Co (HVOF) est généralement de 50 à 80 MPa, le revêtement VPS peut atteindre 60 à 90 MPa.

5. Équipement d'essai

Machine d'essai de traction :

Conforme aux exigences ASTM E4, précision d'étalonnage de la force $\pm 1\%$.

Vitesse de chargement : 0,015-0,025 mm/s (0,6-1,0 mm/min).

Luminaire :

Fixation cylindrique, diamètre de 25,4 mm (1,0 po), avec erreur d'alignement $< 0,05$ mm aux deux extrémités.

Matériau de la pince : acier haute résistance, dureté \geq HRC 40.

Adhésif :

Résine époxy haute résistance (telle que FM 1000), résistance ≥ 70 MPa.

Conditions de durcissement : selon les recommandations du fabricant (par exemple 150°C, 2 heures).

6. Préparation des échantillons

Taille de l'échantillon :

Échantillons cylindriques, 25,4 mm (1,0 po) de diamètre, épaisseur du substrat ≥ 5 mm.

Épaisseur du revêtement : 0,1-1,0 mm (selon le procédé).

Substrat :

Matériau : Généralement en acier, acier inoxydable ou aluminium, surface rendue rugueuse par sablage (Ra 3-5 μ m).

Préparation du revêtement :

Pulvérisation utilisant des procédés de production réels (par exemple HVOF, APS).

La surface du revêtement doit être plane, avec une rugosité de Ra 5-15 μ m.

Collage :

Collez l'échantillon revêtu sur un autre support cylindrique de la même taille.

Épaisseur de l'adhésif : 0,05-0,2 mm, appliquer uniformément et éviter les bulles.

Quantité : Au moins 5 échantillons par groupe, test représentatif.

7. Procédure expérimentale

Étalonnage : Étalonnage de la force de la machine d'essai, précision $\pm 1\%$.

Installation : Fixez l'échantillon dans le dispositif de la machine d'essai en veillant à une erreur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'alignement < 0,05 mm.

Chargement : Appliquer une charge de traction à une vitesse de 0,015 à 0,025 mm/s jusqu'à la rupture de l'échantillon.

Enregistrer :

Force de traction maximale, en N (ou lb) .

Mode de rupture (adhésif, cohésif ou mixte).

calculer :

Résistance de liaison (MPa) = force de traction maximale (N) / section transversale de l'échantillon (mm²) .

Section transversale : 502,7 mm² (diamètre 25,4 mm).

8. Conditions d'essai

Environnement : température 23±2°C, humidité 50±10%, pas de vibration et de gaz corrosif.

Equipement : La machine d'essai doit être protégée contre la surchauffe ou la surcharge.

9. Communication des résultats

Contenu du rapport :

Informations sur le matériau de revêtement et le substrat (par exemple WC-12Co, substrat en acier).

Épaisseur du revêtement (μm) et procédé de préparation (HVOF, APS, etc.).

Type d'adhésif et conditions de durcissement.

Valeurs moyennes de la force de liaison (MPa), y compris l'écart type.

Mode de rupture (adhésif, cohésif ou mixte), avec photographies.

Date du test, opérateur et numéro d'équipement.

Exemple : revêtement WC-Co (HVOF), force de liaison 65±5 MPa, le mode de défaillance est une défaillance mixte.

10. Précision et biais

Précision :

Répétabilité intra-laboratoire : écart type < 5 %.

Reproductibilité interlaboratoire : écart type < 10 %.

écart :

Sources possibles : erreurs d'alignement des échantillons, force d'adhérence insuffisante, défauts de revêtement.

Mesures de contrôle : Suivez strictement les procédures de test et vérifiez la qualité des échantillons.

11. Annexe (référence)

Annexe X 1 : Guide de sélection des adhésifs.

Recommandé : Résine époxy FM 1000, résistance ≥ 70 MPa.

Annexe X 2 : Exemple d'analyse des modes de défaillance.

Exemples : Rupture adhésive (décollement interfacial), rupture cohésive (fracture au sein du revêtement).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12. Mots-clés

Revêtements par projection thermique, adhérence, résistance à la cohésion, essai de traction, force de liaison.

appendice:

ASTM E2109-01(2014)

Méthode d'essai standard pour le pourcentage de porosité apparente des revêtements par projection thermique

1. Portée

1.1 La présente norme spécifie une méthode d'essai permettant de déterminer le pourcentage de porosité apparente des revêtements obtenus par projection thermique par analyse microscopique. Elle s'applique aux revêtements métalliques, céramiques et composites.

Objets applicables : y compris les revêtements en carbure cémenté (tels que WC-Co, Cr₃C₂- NiCr), utilisés dans la projection plasma (APS, VPS), HVOF, DGS et autres procédés.

Objectif de mesure :

Porosité apparente : Pourcentage de la surface des pores dans la section transversale du revêtement par rapport à la surface totale, exprimé en %.

1.2 Cette méthode est applicable aux revêtements d'une épaisseur $\geq 0,05$ mm.

1.3 La présente norme ne traite pas des causes de porosité ni du processus de préparation du revêtement, mais uniquement de la méthode d'essai.

1.4 Les valeurs sont exprimées en unités métriques (%). Les unités impériales entre parenthèses sont données à titre indicatif uniquement.

2. Références

Cette norme fait référence aux documents suivants :

ASTM E3-11 : Pratique standard pour la préparation d'échantillons de microstructure de matériaux métalliques.

ASTM E7-17 : Terminologie pour l'analyse microstructurale des matériaux métalliques.

ASTM E1245-03(2016) : Pratique standard pour déterminer la quantité d'inclusions ou de secondes phases dans les matériaux par analyse d'image.

ASTM E177-14 : Terminologie relative à la précision et au biais dans les données d'ingénierie.

3. Termes et définitions

Porosité apparente : Pourcentage de la surface des pores dans la section transversale du revêtement par rapport à la surface totale, mesurée par analyse d'image microscopique, en %.

Revêtement par projection thermique : Revêtement déposé sur la surface du substrat par un procédé de projection thermique (tel que APS, HVOF).

Porosité : Minuscules vides dans un revêtement ou à une interface qui peuvent être causés par des particules non fondues, un piégeage de gaz ou un retrait lors du refroidissement.

Champ de vision : Zone observée par un microscope, généralement rectangulaire ou circulaire.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Importance et utilisation

Cette méthode d'essai est utilisée pour évaluer la porosité des revêtements par projection thermique, ce qui affecte la résistance à la corrosion, la résistance à l'usure et la force de liaison du revêtement.

Applications typiques :

Aéronautique (revêtements d'aubes de turbines) : porosité < 1% (VPS).

Équipement industriel (revêtement anti-usure) : porosité < 2% (HVOF).

Industrie de l'énergie (revêtement d'équipements de forage) : porosité < 5% (APS).

Exemple : la porosité du revêtement WC-Co (HVOF) est généralement de 0,5 à 2 %, tandis que celle du revêtement VPS peut être inférieure à 1 %.

5. Équipement d'essai

Microscope optique :

Grossissement : 100-1000 fois, 200-500 fois recommandé.

Résolution : Peut distinguer la taille des pores $\geq 1 \mu\text{m}$.

Microscope électronique à balayage (MEB) (facultatif) :

Utilisé pour une analyse de haute précision, avec un grossissement de 500 à 2000 fois.

Logiciel d'analyse d'images :

Il est conforme aux exigences de la norme ASTM E1245 et peut identifier et calculer automatiquement la surface des pores.

Matériel de coupe :

Machine de découpe de précision pour assurer une section transversale lisse.

Matériel de meulage et de polissage :

Papier de verre (grain 240-1200) et chiffon de polissage, utilisant de l'oxyde d'aluminium ou une suspension de diamant.

6. Préparation des échantillons

Taille de l'échantillon :

Dimensions de la section transversale : au moins $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, épaisseur du revêtement $\geq 0,05 \text{ mm}$.

Découpe :

Utilisez un cutter de précision à basse vitesse et un liquide de refroidissement (comme de l'eau) pour éviter la surchauffe.

mosaïque :

Les échantillons ont été montés dans de la résine époxy pour assurer une section transversale stable.

Meulage et polissage :

Ponçage : Utiliser du papier de verre n° 240, 400, 800, 1200 pour réduire progressivement les rayures.

Polissage : Utiliser une suspension diamantée de $1 \mu\text{m}$ et un chiffon de polissage à une vitesse de 150 à 200 tr/min.

Exigences de surface : pas de rayures, les pores sont clairement visibles.

faire le ménage :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Laver à l'éthanol, nettoyer aux ultrasons pendant 5 minutes et sécher.

Quantité : Au moins 3 échantillons par groupe, test représentatif.

7. Procédure expérimentale

Calibrage : Calibrage du grossissement du microscope, précision $\pm 2\%$.

Sélection du champ de vision :

5 à 10 champs de vision ont été sélectionnés au hasard pour couvrir différentes zones de la section transversale du revêtement.

Surface de chaque champ de vision : au moins $0,01 \text{ mm}^2$ (grossissement 200 x).

Acquisition d'images :

Prenez des images à l'aide d'un microscope optique ou d'un MEB pour garantir un contraste élevé des pores.

Les pores apparaissent sombres et la matrice de revêtement apparaît claire.

Analyse d'image :

La porosité a été identifiée à l'aide d'un logiciel d'analyse d'images (conforme à la norme ASTM E1245).

Définir le seuil : exclure le bruit en fonction de la valeur grise des pores.

calculer :

Porosité apparente (%) = (surface totale des pores/champ de vision total) $\times 100$.

La moyenne et l'écart type ont été calculés pour 5 à 10 champs.

8. Conditions d'essai

Environnement : Température $23\pm 2^\circ\text{C}$, humidité $50\pm 10\%$, pas de vibrations ni de poussière.

Éclairage : utilisez un éclairage en fond clair ou en fond noir sur le microscope pour vous assurer que les pores sont clairs.

Matériel : Nettoyage de la lentille du microscope pour éviter les artefacts.

9. Communication des résultats

Contenu du rapport :

Informations sur le matériau de revêtement et le substrat (par exemple WC-12Co, substrat en acier).

Épaisseur du revêtement et procédé de préparation (HVOF, APS, etc.).

Grossissement du microscope et nombre de champs de vision.

Porosité apparente moyenne (%) incluant l'écart type.

Description de la distribution des pores (homogénéité, gamme de tailles), avec image.

Date du test, opérateur et numéro d'équipement.

Exemple : Revêtement WC-Co (HVOF), porosité $1,2\pm 0,3\%$, distribution uniforme des pores, taille maximale des pores $< 5 \mu\text{m}$.

10. Précision et biais

Précision :

Répétabilité intra-laboratoire : écart type $< 0,5 \%$.

Reproductibilité interlaboratoire : écart type $< 1,0 \%$.

écart :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sources possibles : polissage insuffisant de l'échantillon, réglage incorrect du seuil d'image et sélection biaisée du champ de vision.

Mesures de contrôle : Suivre strictement les procédures de préparation et d'analyse des échantillons et augmenter le nombre de champs de vision.

11. Annexe (référence)

Annexe X 1 : Guide de sélection du grossissement du microscope.

Recommandé : épaisseur de revêtement 0,1-0,5 mm, utilisation 200 à 500 fois.

Annexe X 2 : Recommandations de configuration du logiciel d'analyse d'images.

Exemple : plage de réglage du seuil de niveaux de gris (0-255), seuil d'identification des pores < 50.

12. Mots-clés

Revêtements par projection thermique, porosité de surface, analyse microscopique, analyse d'image, distribution des pores.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

EN 657:2005

Projection thermique - Terminologie et classification

1. Portée

1.1 La présente Norme européenne définit les termes et classifications relatifs à la technologie de projection thermique et s'applique à divers procédés de projection thermique (par exemple, projection à la flamme, projection à l'arc, projection au plasma, etc.).

Objets applicables : y compris, mais sans s'y limiter, les revêtements métalliques (tels que le zinc, l'aluminium), les revêtements céramiques (tels que l'alumine, l'oxyde de zirconium) et les revêtements composites (tels que le carbure cimenté WC-Co).

Objectif : Fournir une terminologie unifiée pour faciliter la communication technique, l'établissement de normes et la description des produits.

1.2 Cette norme ne traite pas des paramètres de processus spécifiques ni des exigences de performance et se limite à la terminologie et à la classification.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent des clauses de cette norme par référence dans cette norme.

EN 13507:2018 - Projection thermique — Préparation de surface des pièces métalliques.

EN 13204:2017 - Projection thermique — Poudres — Compositions, conditions techniques de livraison.

ISO 14918:1998 - Projection thermique — Documentation des essais d'inspection et de réception.

Remarque : S'il y a une révision, la dernière version s'applique.

3. Termes et définitions

Cette norme définit les termes suivants relatifs à la projection thermique, organisés par classification de processus et caractéristiques techniques :

3.1 Procédé de projection thermique

Projection thermique :

Un processus de revêtement est formé en chauffant le matériau jusqu'à un état fondu ou semi-fondu et en le pulvérisant sur la surface du substrat à grande vitesse.

Projection à la flamme :

Un procédé qui utilise du gaz combustible (tel que l'acétylène, le propane) pour brûler avec de l'oxygène afin de produire un flux de flamme pour faire fondre et pulvériser le matériau.

Projection à l'arc :

Procédé dans lequel un arc électrique est généré entre deux fils conducteurs pour chauffer le matériau et de l'air comprimé est utilisé pour éjecter les particules en fusion.

Projection plasma :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Procédé qui utilise un arc plasma (température de 10 000 à 15 000 °C) pour faire fondre et pulvériser le matériau, y compris la projection plasma atmosphérique (APS) et la projection plasma sous vide (VPS).

Pulvérisation oxy-carburant à haute vitesse (HVOF) :

Un processus dans lequel une flamme supersonique (500-1000 m/s) est produite en brûlant du carburant (comme du kérosène) avec de l'oxygène.

Pulvérisation d'explosifs puissants (DGS, pulvérisation par pistolet à détonation) :

Procédé dans lequel une onde de choc à haute pression est produite par une explosion contrôlée (oxygène mélangé à de l'acétylène) pour pulvériser.

3.2 Matériaux et revêtements

Matériau de pulvérisation :

Poudres, fils, tiges ou cordes pour la projection thermique de matériaux tels que métaux, alliages, céramiques ou composites.

Revêtement :

La structure en couches formée sur la surface du substrat lors de la projection thermique.

Couche de liaison :

le revêtement et le substrat qui améliore l'adhérence, généralement un métal (tel que Ni-Cr, Ni-Al).

Revêtement Cermet :

Revêtement composite composé de carbures (tels que WC, Cr₃C₂) et de phases de liaison métalliques (telles que Co, Ni).

Éclaboussure :

La structure plate formée par le refroidissement rapide des particules fondues ou semi-fondues après impact sur le substrat est l'unité de base du revêtement.

3.3 Paramètres et performances du processus

Distance de pulvérisation :

La distance entre la buse du pistolet de pulvérisation et la surface du substrat est en mm, généralement 100-200 mm.

Débit d'alimentation :

La quantité de poudre fournie par unité de temps, en g/min.

Force de liaison :

L'adhérence entre le revêtement et le substrat ou à l'intérieur du revêtement, mesurée en MPa.

Porosité :

Le pourcentage du volume des pores du revêtement par rapport au volume total, exprimé en %, affecte la résistance à la corrosion et la résistance à l'usure.

Rugosité de surface

La rugosité microscopique de la surface du revêtement est généralement exprimée en Ra (rugosité moyenne arithmétique) en μm .

3.4 Défauts et défaillances

Fissure :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les fissures dans un revêtement ou à une interface peuvent être causées par des contraintes thermiques ou mécaniques.

Délamination :

Phénomène de décollement du revêtement du substrat ou des couches internes.

Inclusion d'oxyde :

Particules d'oxyde formées dans le revêtement en raison d'une réaction d'oxydation.

4. Classification

4.1 Classification par processus

Projection thermique au gaz :

Y compris la projection à la flamme, la projection à l'arc et le HVOF.

Projection thermique au plasma :

Y compris APS et VPS.

Projection thermique explosive :

Y compris DGS.

4.2 Classification par matériau

Revêtements métalliques :

Tels que les alliages à base de zinc, d'aluminium et de nickel .

Revêtements céramiques :

Tels que Al_2O_3 , ZrO_2 .

Revêtements composites :

Tels que WC - Co, Cr_3C_2 - NiCr .

4.3 Classification par application

Revêtements protecteurs :

Utilisé pour la résistance à la corrosion, à l'usure ou aux hautes températures, comme le revêtement des pipelines industriels.

Revêtements fonctionnels :

Utilisé pour des fonctions spécifiques telles que les revêtements conducteurs ou isolants.

Revêtements de réparation :

Utilisé pour réparer les pièces usées ou corrodées, comme la réparation de moules.

5. Annexe (référence)

Annexe A : Schéma du procédé de projection thermique.

Exemple : Schéma de principe de la pulvérisation à la flamme, montrant le flux de flamme, la buse et la position du substrat.

Annexe B : Tableau de comparaison de la terminologie des matériaux de revêtement courants.

Exemples : WC-Co (alliage dur), NiCr (alliage nickel-chrome).

6. Applicabilité et limites

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Applicabilité : Documentation technique, élaboration de normes et formation pour l'industrie de la projection thermique.

limite :

Il n'inclut pas de paramètres de processus spécifiques ni de méthodes de test de performance, et une référence à d'autres normes (telles que EN 13507, ISO 14923) est requise.

Ne convient pas aux procédés de pulvérisation non thermiques tels que la pulvérisation à froid.

appendice:

EN 13507:2018

Projection thermique - préparation de surface de pièces et composants métalliques

1. Portée

1.1 La présente Norme européenne spécifie les exigences, les méthodes et les critères d'acceptation pour la préparation de surface des pièces et assemblages métalliques avant projection thermique.

Objets applicables : y compris, mais sans s'y limiter, les pièces en acier, en acier inoxydable, en alliage d'aluminium et en alliage de titane, adaptées aux revêtements ultérieurs par projection thermique (tels que WC-Co, Cr₃C₂- NiCr).

Objectif : Assurer la propreté et la rugosité de la surface et améliorer l'adhérence du revêtement au substrat.

1.2 Cette norme s'applique aux procédés de projection à la flamme, de projection à l'arc, de projection au plasma (APS, VPS), HVOF et DGS. 1.3 Cette norme ne couvre pas le prétraitement des substrats non métalliques ni les procédés de préparation des revêtements.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent des clauses de cette norme par référence dans cette norme.

EN 657:2005 - Projection thermique — Terminologie et classification.

EN 1011-1:2009 - Soudage — Soudage par fusion des aciers — Partie 1 : Orientations générales sur les matériaux et les modes opératoires.

EN ISO 8501-1:2007 - Préparation de surface de l'acier — Évaluation visuelle des niveaux de rouille et des degrés de préparation — Partie 1 : Niveaux de rouille et degrés de préparation.

EN ISO 2063:2005 - Projection thermique — Revêtements métalliques et inorganiques — Zinc, aluminium et leurs alliages.

Remarque : S'il y a une révision, la dernière version s'applique.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants, en référence à la norme EN 657:2005 :

Préparation de surface : Processus d'élimination de la contamination de surface et d'amélioration de l'adhérence du revêtement par nettoyage, rugosité ou traitement.

Rugosité : L'irrégularité microscopique de la surface, généralement exprimée en Ra (rugosité moyenne arithmétique), avec l'unité μm .

Grenailage : Procédé qui utilise de l'air à haute pression ou une pulvérisation de type roue de particules dures (telles que du sable et de la grenaille d'acier) pour rendre la surface rugueuse.

Propreté : Degré auquel une surface est exempte d'huile, de rouille et d'oxydes, généralement évalué selon la norme EN ISO 8501-1.

4. Exigences

4.1 Propreté de la surface

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Objectif : Éliminer la graisse, la rouille, les calamines, les scories de soudure et les contaminants.

Notation :

Acier : EN ISO 8501-1 Sa 2 ½ (près blanc) , exempt d'huile et de rouille visibles.

d'aluminium : EN ISO 8501-1 Sa 2 (parfaitement inoxydable), exempt de particules libres.

Méthode d'inspection : inspection visuelle ou loupe (grossissement 5 à 10 fois).

4.2 Rugosité de surface

portée :

Ra recommandé 3-5 µm (rugosité naturelle après sablage).

µm (à convenir) selon le type de revêtement.

Méthode de mesure : Utiliser un profileur de surface à stylet (se référer à la norme EN ISO 4287) avec une longueur d'échantillonnage de 2,5 mm.

Tolérance : Écart Ra ±1 µm .

4.3 Contrôle des contraintes résiduelles

Exigences : Après le prétraitement, les contraintes résiduelles de surface doivent être minimisées pour éviter les fissures.

Méthode : Contrôler la pression de sablage (0,2-0,7 MPa) et l'angle (45-90°).

4.4 Intégrité du substrat

Exigences : Le prétraitement ne doit pas provoquer de déformation ou de dommage significatif au support (tels que fissures, décollement).

Inspection : Inspection visuelle ou contrôle non destructif (tel que l'inspection par particules magnétiques).

5. Méthodes de prétraitement

5.1 Nettoyage

Dégraissage :

Méthode : Nettoyage avec des solvants organiques (tels que le trichloréthylène, l'éthanol) ou nettoyage par ultrasons.

Durée : 5 à 10 minutes, assurez-vous qu'il n'y a pas de tache d'huile.

Élimination de la rouille :

Méthode : décapage (par exemple, solution d'acide chlorhydrique à 10 %) ou nettoyage mécanique (par exemple, brosse métallique).

Remarque : Neutraliser et rincer après le décapage.

5.2 Sablage

équipement :

Machine de sablage, pression 0,2-0,7 MPa, diamètre de buse 6-10 mm.

Abrasif :

Grenaille d'acier : diamètre 0,3-1,0 mm, dureté ≥HRC 40.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sable : Sable de quartz ou corindon, granulométrie 0,2-0,8 mm.

Pureté : Impuretés < 1 %.

paramètre :

Distance de pulvérisation : 100-150 mm.

Angle de pulvérisation : 45-90° (ajustable en fonction de la forme du support).

Temps de sablage : jusqu'à ce que la rugosité et la propreté spécifiées soient atteintes.

Sécurité : Les opérateurs doivent porter un équipement de protection pour éviter d'inhaler les poussières.

5.3 Autres méthodes

Dégrossissage mécanique :

Utiliser une meule ou une rectifieuse adaptée à la zone locale, rugosité Ra 3-5 μ m .

Traitement thermique :

Préchauffer le support à 50-150°C pour améliorer l'adhérence et éviter la condensation.

6. Inspection et acceptation

Méthode d'inspection :

Propreté : Évaluation visuelle selon la norme EN ISO 8501-1.

Rugosité : mesurée par profilomètre à stylet, et la valeur moyenne a été prise à partir de 5 points.

Intégrité de surface : contrôle visuel ou non destructif.

Critères d'acceptation :

Niveau de propreté Sa 2 ½ (acier) ou Sa 2 (aluminium) .

La rugosité est dans la plage spécifiée (Ra 3-5 μ m) .

Aucun dommage ou contamination évident.

Enregistrements : paramètres du procédé de prétraitement, résultats d'inspection et dates.

7. Conditions d'essai

Environnement : Température 15-30°C, humidité <70%, pas de poussière ni de gaz corrosif.

Équipement : Les machines de sablage et les outils de mesure doivent être étalonnés régulièrement (précision $\pm 5\%$).

8. Rapport des résultats

Contenu du rapport :

Informations sur le matériau du substrat et la pièce (acier, acier inoxydable, etc.).

Méthodes de prétraitement (sablage, dégraissage, etc.).

Paramètres du processus (pression, distance, type d'abrasif).

Indice de propreté et mesure de la rugosité (Ra).

Résultats de l'inspection de l'intégrité de la surface.

Date du test, opérateur et numéro d'équipement.

Exemple : Substrat en acier, sablage (grenaille d'acier 0,5 mm, 0,5 MPa, 150 mm), Ra 4,2 μ m , propreté Sa 2 ½ .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9. Applicabilité et limites

Applicabilité : Convient aux pièces et composants métalliques avant la projection thermique pour améliorer l'adhérence du revêtement.

limite :

Ne convient pas aux substrats non métalliques (par exemple céramiques, polymères).

Les performances des revêtements ultérieurs ne sont pas spécifiées et il est fait référence à la norme EN 657 ou ISO 14923.

10. Annexe (référence)

Annexe A : Tableau des paramètres de sablage recommandés.

Exemple : Substrat en acier, pression 0,5 MPa, distance 120 mm, grenaille d'acier 0,5 mm, Ra 4-6 μ m .

Annexe B : Exemples de photos d'évaluation de la propreté (norme Sa 2 ½).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe : .

GB/T 18719-2002

Poudre pour projection thermique

1. Portée

1.1 La présente norme spécifie la classification, les exigences techniques, les méthodes d'essai et les règles d'inspection des poudres utilisées dans les procédés de projection thermique.

Objets applicables : y compris les poudres métalliques (telles que le zinc, l'aluminium), les poudres céramiques (telles que l'alumine, l'oxyde de zirconium) et les poudres composites (telles que le carbure cémenté WC-Co).

Objectif : Garantir que la composition chimique, la distribution granulométrique et la morphologie de la poudre répondent aux exigences du procédé de projection thermique.

1.2 Cette norme s'applique aux procédés tels que la projection à la flamme, la projection à l'arc, la projection au plasma (APS, VPS), HVOF et DGS.

1.3 Cette norme ne traite pas du processus de préparation de la poudre ni des propriétés du revêtement, mais se concentre uniquement sur la poudre elle-même.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent des clauses de cette norme par référence dans cette norme.

GB/T 5314-2002 - Méthode d'essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques.

GB/T 13320-1991 - Terminologie de la métallurgie des poudres.

GB/T 1479.1-1993 - Méthode de détermination de la taille des particules de poudre métallique - Méthode par tamisage.

GB/T 1482-2010 - Méthodes d'échantillonnage et méthodes d'analyse chimique des poudres métalliques.

Remarque : S'il y a une révision, la dernière version s'applique.

3. Termes et définitions

Cette norme adopte les termes et définitions suivants, en référence à GB/T 13320-1991 :

Poudre de projection thermique : Matériau granulaire utilisé dans le processus de projection thermique, qui peut être du métal, un alliage, de la céramique ou un matériau composite.

Taille des particules : Taille linéaire maximale des particules de poudre, en μm .

Répartition granulométrique : La répartition en pourcentage des particules de poudre en fonction de la plage de tailles.

Fluidité : Les caractéristiques d'écoulement de la poudre pendant le processus d'alimentation en poudre, l'unité est s/50g.

Masse volumique apparente : Masse d'une poudre par unité de volume, exprimée en g/cm^3 .

4. Classification

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.1 Classification par type de matériau

Poudre métallique :

Tels que le zinc (Zn), l'aluminium (Al), le nickel (Ni) et le cuivre (Cu).

Poudre de céramique :

oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et oxyde de zirconium (ZrO_2).

Poudre composite :

Tels que WC-Co (carbure cémenté tungstène-cobalt), Cr_3C_2 -NiCr (carbure de chrome nickel-chrome).

4.2 Classification par morphologie

Poudre sphérique : Les particules sont approximativement sphériques et présentent une bonne fluidité.

Poudre irrégulière : Forme de particule irrégulière, adaptée à des procédés spécifiques.

Poudre creuse : particules avec des vides à l'intérieur pour réduire la densité.

5. Exigences techniques

5.1 Composition chimique

Exiger :

L'écart de teneur des principaux éléments est de $\pm 0,5\%$ (tels que WC, Co).

Teneur totale en impuretés $< 1\%$ (oxygène $< 0,5\%$, soufre $< 0,1\%$).

Méthode d'essai : Méthode d'analyse chimique ou méthode d'analyse spectrale spécifiée dans la norme GB/T 1482.

5.2 Distribution granulométrique

portée :

Plage commune : 10-75 μm .

Processus spécifique :

APS/VPS : 10-50 μm .

HVOF : 10-45 μm .

DGS : 10-50 μm .

tolérance :

90 % des particules se situent dans la plage spécifiée.

$< 5\%$ des particules dépassent la limite supérieure de taille des particules.

Méthode d'essai : méthode de criblage GB/T 1479.1 ou méthode d'analyse granulométrique au laser.

5.3 Liquidité

Exiger :

Poudre sphérique : ≤ 20 s/50g.

Poudre irrégulière : ≤ 30 s/50g.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Méthode d'essai : Utiliser un débitmètre à effet Hall et mesurer conformément à l'annexe de la norme GB/T 1479.1.

5.4 Densité apparente

Exiger :

Poudre sphérique : 2,0-5,0 g/cm³ (selon le matériau).

Poudre irrégulière : 1,5-4,0 g/cm³.

Méthode d'essai : Méthode de détermination de la densité apparente spécifiée dans la norme GB/T 1479.1.

5.5 Microstructure

Exiger :

Il n'y a pas d'oxydation ou de contamination sérieuse à la surface des particules.

L'épaisseur de la paroi de la poudre creuse est uniforme et il n'y a pas de fissures.

Méthode d'inspection : microscopie optique (grossissement 100-500 fois) ou microscopie électronique à balayage (MEB).

6. Méthodes d'essai

6.1 Échantillonnage

Méthode : Échantillonnage stratifié ou échantillonnage mécanique tel que spécifié dans la norme GB/T 1482.

Quantité : Le volume d'échantillonnage de chaque lot est ≥ 200 g, échantillons représentatifs.

6.2 Analyse de la composition chimique

Méthode : Méthode d'analyse spectroscopique ou de titrage chimique spécifiée dans la norme GB/T 1482.

Précision : Erreur de l'élément principal $\pm 0,2$ %, erreur d'impureté $\pm 0,05$ %.

6.3 Détermination de la granulométrie

Méthode : méthode de tamisage GB/T 1479.1 (tamis standards : 45, 63, 75 μ m) ou granulomètre laser.

Répétabilité : 3 mesures, écart <5%.

6.4 Détermination de la fluidité

Méthode : GB/T 1479.1 Méthode du godet à flux Hall, enregistrez le temps nécessaire au passage de 50 g de poudre.

Répétabilité : 3 mesures, valeur moyenne.

6.5 Détermination de la densité apparente

Méthode : méthode de la tasse à mesurer standard GB/T 1479.1, mesurant la masse de 100 cm³ de poudre.

Répétabilité : Écart < 0,1 g/cm³ après 3 mesures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.6 Examen microstructural

Méthode : Microscope optique ou MEB, grossissement 100-500 fois.

Rapport : Morphologie des particules, état de surface et épaisseur de paroi des nouilles creuses.

7. Règles d'inspection

Définition du lot : Le même lot de production, poids ≤ 500 kg.

Échantillonnage : 1 à 3 échantillons sont prélevés dans chaque lot, ajustés en fonction de la taille du lot.

Critères d'acceptation :

La composition chimique, la distribution granulométrique, la fluidité et la densité apparente doivent être conformes aux exigences des sections 5.1 à 5.4.

Il n'y a aucun défaut évident dans la microstructure.

Traitement non qualifié : les échantillons non qualifiés doivent être retestés ou mis au rebut.

8. Marquage, emballage et transport

marque :

Le nom du matériau (tel que WC-12Co), le numéro de lot et la date de production sont indiqués sur l'emballage.

Emballer :

Utilisez des sacs en plastique scellés ou des boîtes en métal pour éviter l'humidité et l'oxydation.

Poids par colis : 5-25 kg.

Transport : Eviter les températures élevées ($<40^{\circ}\text{C}$) et l'humidité pour éviter toute contamination de la poudre.

9. Communication des résultats

Contenu du rapport :

Informations sur le matériau et la classification de la poudre.

Résultats d'analyse de la composition chimique.

Mesures de distribution granulométrique, de fluidité et de densité apparente.

Résultats de l'examen microstructural (photos ci-jointes).

Méthode d'essai et numéro d'équipement.

Numéro de lot de production, date et signature de l'inspecteur.

Exemple : poudre de WC-12Co, granulométrie 10-45 μm , fluidité 18 s/50 g, masse volumique apparente 4,2 g/cm^3 , pas d'oxydation de surface.

10. Applicabilité et limites

Applicabilité : Convient à la production, à l'inspection et à l'utilisation de poudres de projection thermique.

limite :

Ne convient pas à une utilisation avec du fil, une tige ou une corde.

Il n'existe aucune réglementation sur les performances du revêtement, veuillez vous référer à la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

norme GB/T 8642 ou ISO 14923.

11. Annexe (référence)

Annexe A : Tableau de distribution granulométrique recommandée.

Exemple : poudre APS, 10-50 μ m , conformité > 90 %.

Annexe B : Schéma de principe du dispositif d'essai de fluidité.

appendice:

GB/T 17391-2008

Méthode d'essai d'adhérence du revêtement par projection thermique

1. Portée

1.1 La présente norme spécifie les méthodes d'essai permettant de déterminer l'adhérence des revêtements projetés thermiquement et s'applique aux revêtements métalliques, céramiques et composites.

Objets applicables : y compris les revêtements en carbure cimenté (tels que WC-Co, Cr₃C₂-NiCr), utilisés dans les procédés de projection à la flamme, de projection à l'arc, de projection au plasma (APS, VPS), HVOF et DGS.

Objectif de mesure :

Adhérence : Force de liaison entre le revêtement et le substrat, mesurée en MPa.

Force de cohésion : La force de liaison au sein du revêtement, mesurée en MPa.

1.2 Cette méthode est applicable aux revêtements d'une épaisseur $\geq 0,1$ mm.

1.3 Cette norme n'implique pas les processus de préparation des revêtements, mais fournit uniquement des méthodes d'essai d'adhérence.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent des clauses de cette norme par référence dans cette norme.

GB/T 531-1999 - Méthode d'essai pour la dureté Vickers des matériaux métalliques.

GB/T 13320-1991 - Terminologie de la métallurgie des poudres.

GB/T 14623-2003 - Méthodes d'essai de traction pour matériaux métalliques.

GB/T 8642-2002 - Détermination de l'épaisseur des revêtements de zinc, d'aluminium et de leurs alliages projetés thermiquement.

Remarque : S'il y a une révision, la dernière version s'applique.

3. Termes et définitions

Cette norme adopte les termes et définitions suivants, en référence à GB/T 13320-1991 :

Force d'adhérence : La contrainte de traction requise pour la séparation entre le revêtement et l'interface du substrat, mesurée en MPa.

Résistance à la cohésion : La contrainte de traction requise pour la séparation des particules dans le revêtement, mesurée en MPa.

Revêtement par projection thermique : Revêtement déposé sur la surface du substrat par un procédé de projection thermique.

Mode de défaillance :

Rupture d'adhérence : Fracture à l'interface entre le revêtement et le substrat.

Rupture cohésive : Fracture au sein du revêtement.

Rupture mixte : Combinaison de rupture adhésive et cohésive.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Importance et utilisation

Cette méthode d'essai est utilisée pour évaluer la qualité de liaison des revêtements par projection thermique et convient au contrôle qualité, au développement de matériaux et à la vérification des performances.

Applications typiques :

Aéronautique (revêtement d'aubes de turbine) : adhérence du revêtement WC-Co 50-80 MPa.

Équipement industriel (revêtement résistant à l'usure) : adhérence du revêtement HVOF 60-90 MPa.

Industrie de l'énergie (revêtement d'équipements de forage) : adhérence du revêtement Cr₃C₂ - NiCr 40-70 MPa.

5. Équipement d'essai

Machine d'essai de traction :

Conforme aux exigences de la norme GB/T 14623, précision d'étalonnage de la force $\pm 1\%$.

Vitesse de chargement : 0,5-2 mm/min.

Luminaire :

Fixation cylindrique, diamètre 25 mm, erreur d'alignement $< 0,05$ mm aux deux extrémités.

Matériau : acier haute résistance, dureté \geq HRC 40.

Adhésif :

Résine époxy haute résistance (telle que FM 1000), résistance à la traction ≥ 70 MPa.

Conditions de durcissement : selon les recommandations du fabricant (par exemple 120°C, 1 à 2 heures).

6. Préparation des échantillons

Taille de l'échantillon :

Échantillon cylindrique, diamètre 25 mm, épaisseur du substrat ≥ 5 mm.

Épaisseur du revêtement : 0,1-1,0 mm (selon le procédé).

Substrat :

Matériau : Généralement en acier, acier inoxydable ou aluminium, surface rendue rugueuse par sablage (Ra 3-5 μ m).

Préparation du revêtement :

Pulvérisation utilisant des procédés de production réels (par exemple HVOF, APS).

La surface du revêtement doit être plane, avec une rugosité de Ra 5-15 μ m.

Collage :

Collez l'échantillon revêtu sur un autre support cylindrique de la même taille.

Épaisseur de l'adhésif : 0,05-0,2 mm, appliquer uniformément et éviter les bulles.

Quantité : Au moins 5 échantillons par groupe, test représentatif.

7. Procédure expérimentale

Étalonnage : Étalonnage de la force de la machine d'essai, précision $\pm 1\%$.

Installation : Fixez l'échantillon dans le dispositif de la machine d'essai en veillant à une erreur d'alignement $< 0,05$ mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chargement : Appliquer une charge de traction à une vitesse de 0,5 à 2 mm/min jusqu'à ce que l'échantillon se rompe.

Enregistrer :

Force de traction maximale, unité : N.

Mode de rupture (adhésif, cohésif ou mixte).

calculer :

Adhérence ou résistance à la cohésion (MPa) = force de traction maximale (N) / section transversale de l'échantillon (mm²) .

Section transversale : 490,9 mm² (diamètre 25 mm).

8. Conditions d'essai

Environnement : Température 20±5°C, humidité <60%, pas de vibration et de gaz corrosif.

Equipement : La machine d'essai doit être protégée contre la surchauffe ou la surcharge.

9. Communication des résultats

Contenu du rapport :

Informations sur le matériau de revêtement et le substrat (par exemple WC-12Co, substrat en acier).

Épaisseur du revêtement (μm) et procédé de préparation (HVOF, APS, etc.).

Type d'adhésif et conditions de durcissement.

Valeurs moyennes de la force d'adhérence ou de cohésion (MPa) incluant l'écart type.

Mode de rupture (adhésif, cohésif ou mixte), avec photographies.

Date du test, opérateur et numéro d'équipement.

Exemple : Revêtement WC-Co (HVOF), adhérence 65 ± 5 MPa, le mode de défaillance est une défaillance mixte.

10. Précision et biais

Précision :

Répétabilité intra-laboratoire : écart type < 5 %.

Reproductibilité interlaboratoire : écart type < 10 %.

écart :

Sources possibles : erreurs d'alignement des échantillons, force d'adhérence insuffisante, défauts de revêtement.

Mesures de contrôle : Suivez strictement les procédures de test et vérifiez la qualité des échantillons.

11. Annexe (référence)

Annexe A : Guide de sélection des adhésifs.

Recommandé : Résine époxy FM 1000, résistance ≥ 70 MPa.

Annexe B : Exemples d'analyse des modes de défaillance.

Exemples : Rupture adhésive (décollement interfacial), rupture cohésive (fracture au sein du revêtement).

12. Applicabilité et limites

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Applicabilité : Convient aux tests d'adhérence et de résistance à la cohésion des revêtements projetés thermiquement.

limite :

Ne convient pas aux revêtements ultra-minces d'une épaisseur $< 0,1$ mm.

Il n'existe aucune réglementation sur la porosité du revêtement ou la résistance à l'usure, veuillez vous référer à la norme GB/T 8642 ou ASTM G65.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

AMS 2437 : Spécification du procédé HVOF

La norme AMS 2437 n'est pas une spécification pour le procédé HVOF (projection d'oxygène combustible à haute vitesse), mais pour le procédé de dépôt par projection plasma. Vous trouverez ci-dessous une description détaillée de la norme AMS 2437, ainsi qu'une comparaison et des précisions avec la spécification du procédé HVOF.

AMS 2437 : Spécification du procédé de projection plasma

L'AMS 2437 est une norme publiée par SAE International. La dernière version est l'AMS 2437D (13/12/2019), intitulée « Revêtement, dépôt par projection plasma ». Cette norme spécifie les exigences techniques et les performances des revêtements déposés sur des pièces par projection plasma.

1. Portée

Objets applicables : Convient aux revêtements métalliques, céramiques et composites (tels que WC-Co, alumine), utilisés dans l'aérospatiale, l'industrie et d'autres domaines.

Procédé : Projection plasma (APS), où un arc plasma à haute température (10 000-15 000 °C) fait fondre la poudre et la pulvérise sur la surface du substrat.

Objectif : Fournir des revêtements résistants à l'usure, à la corrosion ou à barrière thermique (par exemple TBC) pour les applications à forte usure.

Épaisseur : Généralement < 1 mm, selon l'application.

2. Exigences clés

Propriétés du revêtement :

Adhérence : évaluée par un test de coupe ou un test de pliage, conformément à la section 3.6.1.

Dureté : Selon la section 3.6.5, en fonction du matériau de revêtement (par exemple dureté WC-Co ≥ 1000 HV).

Porosité : Généralement < 5 %, par examen microscopique.

test :

Essai de réception (4.2.1) : Chaque lot est testé pour l'adhérence et la dureté.

Essais périodiques (4.2.2) : Vérification régulière de la stabilité du processus.

Essais de pré-production (4.2.3) : Les nouveaux procédés ou matériaux nécessitent une vérification supplémentaire.

3. Restrictions

Ne convient pas au procédé HVOF.

Il n'y a pas de double revêtement (c'est-à-dire de pulvérisation sur une couche existante).

Spécification du procédé HVOF : AMS 2447

Les utilisateurs peuvent confondre la norme AMS 2437 avec la spécification du procédé HVOF. La spécification correcte pour le procédé HVOF est la norme AMS 2447, dont la dernière version est la norme AMS 2447D (14/01/2019), intitulée « Revêtement, projection thermique, procédé

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oxygène/carburant à haute vitesse ».

1. Portée

Objets applicables : Convient aux revêtements déposés par le procédé HVOF, tels que le carbure cémenté (WC-Co, WC-CoCr), l'alliage métallique (NiCr), largement utilisé dans les applications aérospatiales à haute résistance à l'usure.

Procédé : Le HVOF produit une flamme supersonique (500-1000 m/s) en brûlant du carburant (comme le kérosène) avec de l'oxygène pour déposer un revêtement à haute densité.

Objectif : Fournir une excellente résistance à l'usure et à la corrosion, meilleure que la projection plasma (comme AMS 2437).

2. Exigences clés

Propriétés du revêtement :

Porosité : < 2 %, significativement inférieure à la projection plasma.

Adhérence : Généralement > 70 MPa (contre 50-60 MPa pour la projection plasma).

Rugosité de surface : Ra 6-16 μm (selon l'application, par exemple les joints nécessitent < 0,15 μm).

Matériel :

Poudres couramment utilisées : WC-17Co, WC-10Co-4Cr (AMS 7881, AMS 7882).

Plage d'épaisseur : 25-500 μm (carbure), les revêtements en alliage peuvent être plus épais.

test :

Inspection par ressuage fluorescent (FPI) : Vérification des fissures.

Barkhausen : évaluation de la brûlure de meulage.

Restrictions : Ne convient pas au double revêtement.

3. Applications typiques

Aéronautique : aubes de turbine, trains d'atterrissage (adhérence 60-90 MPa).

Industrie : rouleaux résistants à l'usure, joints.

4. Comparaison avec AMS 2437

Procédé : L'AMS 2437 (projection plasma) présente une température élevée et une porosité élevée (3-5 %) ; l'AMS 2447 (HVOF) présente une vitesse élevée et une faible porosité (< 2 %).

Performances : Les revêtements HVOF (tels que WC-Co) ont une meilleure adhérence et une meilleure résistance à l'usure que la projection plasma.

Application : L'AMS 2437 est plus adapté aux revêtements de barrière thermique (tels que ZrO_2), tandis que l'AMS 2447 est plus adapté aux revêtements à haute résistance à l'usure (tels que WC-Co).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ISO 3252:2019

Terminologie de la métallurgie des poudres Métallurgie des poudres — Vocabulaire

1. Portée

1.1 La présente Norme internationale définit la terminologie dans le domaine de la métallurgie des poudres, couvrant la préparation, la caractérisation et les techniques d'application des poudres.

Objets applicables : y compris les poudres métalliques (telles que le zinc, l'aluminium), les poudres céramiques (telles que l'alumine) et les poudres composites (telles que le carbure cimenté WC-Co), adaptées aux procédés tels que la projection thermique, le frittage et la fabrication additive.

Objectif : Fournir une terminologie unifiée pour faciliter la communication technique, l'établissement de normes et la recherche.

1.2 Cette norme ne traite pas des paramètres de processus spécifiques ni des méthodes d'essai de performance, mais se concentre uniquement sur les définitions des termes.

2. Références normatives

Il n'y a pas de références directes à d'autres normes, mais la terminologie est liée à la norme ISO 4490 (détermination de la granulométrie des poudres) et à la norme ISO 3953 (terminologie étendue pour la métallurgie des poudres).

3. Termes et définitions

Cette norme classe divers aspects de la métallurgie des poudres et définit les termes clés suivants :

3.1 Caractéristiques de la poudre

Poudre : Matériau libre constitué de particules, dont la taille varie généralement de 1 nm à 1 mm.

Taille des particules : Taille linéaire maximale d'une seule particule, exprimée en μm ou en nm.

Répartition granulométrique : La répartition en pourcentage des particules de poudre en fonction de la plage de tailles, généralement exprimée par D10, D50 et D90.

Morphologie : Forme et caractéristiques de surface des particules, telles que sphériques, irrégulières ou polyédriques.

Surface spécifique : Surface totale par unité de masse de poudre, exprimée en m^2/g .

3.2 Propriétés physiques

Masse volumique apparente : Masse par unité de volume de poudre lorsqu'aucune force externe n'est appliquée, exprimée en g/cm^3 .

Masse volumique après tassement : Masse par unité de volume de poudre après tassement, exprimée en g/cm^3 .

Fluidité : Caractéristiques d'écoulement de la poudre sous l'effet de la gravité ou d'une action mécanique, l'unité est s/50g (méthode de la coupelle à écoulement Hall).

Compressibilité : Capacité d'une poudre à réduire son volume après avoir été comprimée, exprimée

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en g/cm³ .

3.3 Propriétés chimiques

Composition chimique : La teneur en pourcentage de chaque élément ou composé dans la poudre.

Teneur en oxyde : Fraction massique d'oxyde dans la poudre, exprimée en %.

Impureté : Éléments ou composés non intentionnels autres que le composant principal.

3.4 Préparation et traitement

Atomisation : Processus de préparation de poudre en exposant du métal en fusion à un liquide ou à un gaz.

Alliage mécanique : Procédé de mélange et d'alliage de composants en poudre par broyage à billes à haute énergie.

Frittage : Processus de combinaison de particules de poudre en matériaux poreux ou denses à haute température.

Projection thermique : Procédé dans lequel la poudre est chauffée jusqu'à un état fondu ou semi-fondu, puis pulvérisée sur la surface du substrat.

3.5 Applications

Cermet : Matériau composite composé de carbure (tel que le WC) et d'une phase de liaison métallique (telle que le Co).

additive : Un procédé qui utilise le dépôt de poudre en couches pour créer des pièces, comme la fusion sélective par laser (SLM).

Revêtement : Couche protectrice ou fonctionnelle formée sur la surface d'un substrat par projection ou dépôt thermique.

3.6 Méthodes d'essai

Tamisage : Méthode permettant de déterminer la distribution granulométrique des poudres à l'aide d'un tamis standard.

Analyse par diffraction laser : une technologie qui utilise la diffusion laser pour mesurer la distribution granulométrique des particules de poudre.

Examen microscopique : Analyser la morphologie et les défauts de la poudre à l'aide d'un microscope optique ou électronique à balayage (MEB).

4. Classification

Par type de matériau :

Poudre métallique (comme Fe, Cu).

Poudres céramiques (telles que Al₂O₃, ZrO₂).

Poudres composites (telles que WC-Co).

Par forme de particule :

Poudre sphérique.

Poudre irrégulière.

Poudre poreuse ou creuse.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Par application :

Matériaux de structure.

Matériaux fonctionnels (tels que les revêtements conducteurs).

5. Annexes

Annexe A : Glossaire des termes (anglais-chinois).

Exemples : taille des particules, fluidité.

Annexe B : Schéma de principe de la morphologie des particules.

Exemples : poudre sphérique, poudre en forme d'aiguille.

6. Applicabilité et limites

Applicabilité : Documentation technique, élaboration de normes et formation pour l'industrie de la métallurgie des poudres, y compris l'utilisation de la terminologie pour les poudres de projection thermique.

limite :

Il n'inclut pas de méthodes de test spécifiques ni de paramètres de processus, qui nécessitent une référence à des normes telles que la norme ISO 4490.

Définitions de termes non applicables aux domaines autres que la métallurgie des poudres.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ISO 14923:2003

Projection thermique

—Caractérisation et essais de revêtements projetés thermiquement

Projection thermique

— Caractérisation et essais de revêtements par projection thermique

1. Portée

1.1 La présente Norme internationale spécifie des méthodes de caractérisation et d'essai des revêtements projetés thermiquement (TWC) permettant d'évaluer leurs propriétés et leur qualité.

Objets applicables : y compris les revêtements métalliques (tels que le zinc, le nickel), les revêtements céramiques (tels que l'alumine) et les revêtements composites (tels que le carbure cémenté WC-Co/revêtement Cermet), adaptés à la projection à la flamme (projection à la flamme / projection à la flamme), à la projection à l'arc (projection à l'arc / projection à l'arc), à la projection au plasma (projection au plasma, APS/VPS / projection au plasma, APS/VPS), aux procédés HVOF et DGS.

Objectif : Fournir des méthodes d'essai standardisées pour évaluer des propriétés telles que l'adhérence, la porosité et l'épaisseur.

1.2 La présente norme s'applique aux revêtements d'une épaisseur (Épaisseur) $\geq 0,05$ mm.

1.3 Cette norme ne couvre pas le processus de préparation du revêtement (Processus de préparation du revêtement / Processus de préparation du revêtement), mais fournit uniquement des méthodes d'essai et des techniques de caractérisation.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent les clauses de cette norme par référence dans cette norme :

ISO 4287:1997 - Spécification géométrique des produits (GPS) — État de surface : Méthode du profil — Termes, définitions et paramètres d'état de surface / Spécification géométrique des produits (GPS) — État de surface : Méthode du profil — Termes, définitions et paramètres d'état de surface

ISO 6507-1:2005 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers — Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 8501-1:2007 - Préparation des subjectiles d'acier avant application de peintures et de produits assimilés — Évaluation visuelle de la propreté de surface — Partie 1 : Degrés de rouille et degrés de préparation des subjectiles d'acier non revêtus et des subjectiles d'acier après élimination totale des revêtements précédents

ISO 9227:2017 - Essais de corrosion en atmosphère artificielle — Essais au brouillard salin

Remarque : S'il existe une version révisée, la dernière version s'appliquera.

3. Termes et définitions

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Revêtement projeté thermiquement : Revêtement déposé sur la surface d'un substrat par un procédé de projection thermique.

Adhérence : Force de liaison entre le revêtement et le substrat (Bonding Strength), mesurée en MPa.

Cohésion : Force de liaison entre les particules à l'intérieur du revêtement, mesurée en MPa.

Porosité : Pourcentage du volume des pores d'un revêtement par rapport au volume total, exprimé en %.

Épaisseur : Distance verticale entre la surface du substrat et le sommet du revêtement (distance verticale), en μm .

4. Méthodes de caractérisation

4.1 Mesure de l'épaisseur

Méthode:

Méthode magnétique (ISO 2178) : applicable aux revêtements non magnétiques sur substrats magnétiques.

Méthode des courants de Foucault (ISO 2360) : applicable aux revêtements non conducteurs sur des substrats métalliques non magnétiques.

Méthode microscopique : Observation en coupe transversale, mesurer 5 points et prendre la valeur moyenne.

Précision : $\pm 5\%$ ou $\pm 5\ \mu\text{m}$ (selon la valeur la plus élevée).

4.2 Détermination de la porosité

Méthode:

Méthode microscopique : analyse d'images en coupe transversale pour calculer le pourcentage de surface des pores.

Méthode de pénétration : Utiliser une pénétration de colorant (colorant / colorant) ou de gaz (gaz / gaz) pour évaluer la connectivité des pores.

Précision : $\pm 1\%$ ou $\pm 0,5\%$ (selon le grossissement).

4.3 Rugosité de surface

Méthode : Profilomètre à stylet (ISO 4287), mesure de la valeur Ra.

Plage : La valeur typique est de 2 à 15 μm , selon l'application.

4.4 Analyse microstructurale

Méthode : Microscope optique ou microscope électronique à balayage (MEB), grossissement 50-1000x.

Paramètres : Observez les fissures, les inclusions d'oxyde et la morphologie des éclaboussures.

5. Méthodes d'essai

5.1 Test d'adhérence

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Méthode : Essai de traction (ISO 4624) à l'aide d'un adhésif et d'une machine d'essai de traction.

Échantillon : diamètre 25 mm, épaisseur du revêtement 0,1-1,0 mm.

Taux de chargement : 0,5-2 mm/min.

Calcul : Adhérence (MPa) = Force maximale / Section transversale.

Mode de défaillance : défaillance adhésive ou défaillance cohésive.

5.2 Essai de dureté

Méthode : Essai de dureté Vickers (ISO 6507-1), charge 5-10 N.

Précision : ± 5 HV ou ± 10 % (selon la valeur la plus élevée).

5.3 Essais de résistance à la corrosion

Méthode : Essai au brouillard salin (ISO 9227), Durée : 24 à 480 heures.

Évaluation : Enregistrez le pourcentage de surface rouillée.

5.4 Essais de résistance à l'usure

Méthode : La perte de volume a été mesurée selon la norme ASTM G65 (test sur sable sec/roue en caoutchouc).

Précision : $\pm 5\%$ ou $\pm 0,1$ mm³.

6. Préparation des échantillons

Dimensions:

Mesure de l'épaisseur : 10 mm × 10 mm × épaisseur du revêtement.

Test d'adhérence : Diamètre 25 mm, épaisseur ≥ 5 mm.

Préparation de surface : Sablage (Ra 3-5 μ m) , Élimination des contaminants.

Quantité : ≥ 3 échantillons par groupe, tests représentatifs.

7. Conditions d'essai

Environnement : Température $20 \pm 5^\circ\text{C}$, Humidité $< 60\%$, pas de vibration.

Équipement : Calibrage (Calibration / Calibration), précision (Accuracy / Accuracy) $\pm 2\%$.

8. Rapport de test

Contenu

Informations sur le matériau de revêtement et le substrat (par exemple WC-12Co, substrat en acier) .

Procédé de préparation (Processus / Procédé de préparation, tel que HVOF) et épaisseur du revêtement (Épaisseur / Épaisseur du revêtement).

Résultats de caractérisation (épaisseur, porosité, rugosité).

Résultats des tests (Résultats des tests / Résultats des tests, Adhérence, Dureté, Résistance à la corrosion).

Photos du mode de défaillance (Failure Mode) et de la microstructure (Microstructure).

Date du test (Date / Test date), opérateur (Operator / Operator) et numéro d'équipement (Equipment Number / Equipment Number).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Exemple : revêtement WC-Co (HVOF), épaisseur 250 μ m , porosité 1,5 %, adhérence 70 MPa, le mode de rupture est une rupture cohésive.

9. Précision et biais

Précision : Écart intra-laboratoire (Intra-laboratoire / Intra-laboratoire) < 5 %, entre laboratoires (Entre laboratoires / Entre laboratoires) < 10 %.

Biais : Peut être dû à une préparation inégale de l'échantillon ou à un étalonnage inadéquat de l'équipement. La qualité de la préparation de surface doit être contrôlée.

10. Annexes

Annexe A (Annexe A / Annexe A) : Diagramme de mesure d'épaisseur (Diagramme de mesure d'épaisseur / Diagramme de mesure d'épaisseur).

Annexe B (Annexe B / Annexe B) : Procédure de préparation des échantillons de test d'adhérence (Procédure de préparation des échantillons de test d'adhérence / Procédure de préparation des échantillons de test d'adhérence).

11. Applicabilité et limites

Applicabilité : Applicable au contrôle qualité et à l'évaluation des performances des revêtements projetés thermiquement.

Limites:

Ne convient pas aux revêtements ultra-minces d'une épaisseur < 0,05 mm.

Le processus de préparation du revêtement n'est pas spécifié et il est fait référence à la norme ISO 14917:2017 - *Projection thermique — Terminologie, classification* .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ISO 4505:2017

Matériaux métalliques

— Essai de dureté — Méthode d'essai

Matériaux métalliques

— Essai de dureté — Méthode d'essai

1. Portée

1.1 La présente Norme internationale spécifie une méthode générale d'essai de dureté des matériaux métalliques. Elle s'applique aux essais de dureté Vickers, Brinell et Rockwell.

Objets applicables : Applicable aux matériaux métalliques, y compris les revêtements projetés thermiquement (tels que le revêtement en carbure cémenté WC-Co/Cermet) et autres pièces métalliques.

Objectif : Fournir une méthode d'essai de dureté standardisée pour garantir la répétabilité et la comparabilité des résultats.

1.2 La présente norme s'applique aux échantillons d'une épaisseur $\geq 0,5$ mm.

1.3 Cette norme ne couvre pas les essais de dureté des matériaux non métalliques tels que les céramiques ou les plastiques, mais peut être étendue aux composites à matrice métallique.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent les clauses de cette norme par référence dans cette norme :

ISO 6506-1:2014 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Brinell — Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 6507-1:2018 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers — Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 6508-1:2016 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 18265:2013 - Matériaux métalliques — Conversion des valeurs de dureté

Remarque : S'il existe une version révisée, la dernière version s'appliquera.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Dureté : Capacité d'un matériau à résister à une déformation plastique locale, généralement mesurée par indentation.

Dureté Vickers (Vickers Hardness) : Dureté mesurée en pressant un pénétrateur en diamant de forme carrée et conique (Diamond Indenter), exprimée en HV.

Dureté Brinell (Brinell Hardness / Brinell Hardness) : Dureté mesurée en indentant une bille de carbure (Carbide Bille / Carbide Bille), exprimée en HBW.

Dureté Rockwell : La dureté est mesurée en pressant une bille de diamant ou d'acier dans la pièce à tester et en mesurant la profondeur, exprimée en HR (comme HRC, HRB).

Indentation : Marque de déformation permanente laissée par le pénétrateur sur la surface de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'échantillon.

4. Principes du test

Dureté Vickers : utilisez un pénétrateur diamanté à cône carré de 136° pour appliquer une charge spécifiée, mesurez la longueur diagonale de l'empreinte et calculez la valeur de dureté.

Dureté Brinell : utilisez une bille en carbure pour appliquer une charge, mesurez le diamètre d'indentation et calculez la valeur de dureté.

Dureté Rockwell : appliquez une précharge et une charge principale, mesurez la profondeur d'indentation et lisez directement la valeur de dureté.

5. Méthodes d'essai

5.1 Essai de dureté Vickers

Équipement : Duromètre Vickers, conforme à la norme ISO 6507-1.

Charge : 0,01 kgf à 100 kgf (0,098 N à 980,7 N).

Procédure:

Appliquez la charge et maintenez-la pendant 10 à 15 secondes.

Mesurez la longueur diagonale de l'indentation au moins deux fois et prenez la valeur moyenne.

Calcul:

$HV = 1,8544 \times F / d^2$, où F est la charge (N) et d est la longueur diagonale moyenne (mm).

Précision : ± 5 HV ou ± 5 % (selon la valeur la plus élevée).

5.2 Essai de dureté Brinell

Équipement : Duromètre Brinell, conforme à la norme ISO 6506-1.

Charge : 1 kgf à 3000 kgf (9,807 N à 29420 N).

Diamètre de la bille : 1 mm, 2,5 mm, 5 mm ou 10 mm.

Procédure:

Appliquez la charge et maintenez-la pendant 10 à 15 secondes.

Mesurez le diamètre d'indentation (Diamètre) dans au moins deux directions et prenez la valeur moyenne.

Calcul:

$HBW = 0,102 \times (2F / (\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})))$, où F est la charge (N), D est le diamètre de la bille (mm) et d est le diamètre d'indentation (mm).

Précision : ± 5 HBW ou ± 5 % (selon la valeur la plus élevée).

5.3 Essai de dureté Rockwell

Équipement : Duromètre Rockwell, conforme à la norme ISO 6508-1.

Charger:

Précharge : 10 kgf (98,07 N).

principale : 60 kgf, 100 kgf ou 150 kgf (588,4 N, 980,7 N ou 1471 N).

Pénétrateur : cône en diamant ou bille en acier.

Procédure:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Appliquez la précharge et maintenez-la pendant 2 à 5 secondes.
Appliquez la charge principale et maintenez-la pendant 4 à 6 secondes.
Retirez la charge principale et lisez la valeur de dureté.
Précision : $\pm 0,5$ HRC ou ± 1 % (selon la valeur la plus élevée).

6. Préparation des échantillons

Préparation de la surface : La surface de l'échantillon doit être plane, avec une rugosité de $R_a < 0,8$ μm , et les traces d'oxyde et les taches d'huile doivent être éliminées.
Épaisseur : Épaisseur de l'échantillon ≥ 10 fois la profondeur d'indentation.
Quantité : ≥ 3 échantillons par groupe, tests représentatifs.

7. Conditions d'essai

Environnement : Température $20 \pm 5^\circ C$, Humidité $< 60\%$, pas de vibration.
Étalonnage de l'équipement : Précision du testeur de dureté ± 2 %, étalonné une fois par an.

8. Rapport de test

Contenu

Informations sur le matériau de l'échantillon et le substrat (par exemple, revêtement WC-Co, substrat en acier).

Méthode d'essai (méthode d'essai / méthode d'essai, telle que la dureté Vickers).

Charge (Load) et type de pénétrateur (Indenter Type).

Valeur de dureté (Dureté Value) et écart type (Standard Deviation).

Date du test (Date / Test date), opérateur (Operator / Operator) et numéro d'équipement (Equipment Number / Equipment Number).

Exemple : Revêtement WC-Co, dureté Vickers HV 1200 ± 20 (charge 5 N).

9. Précision et biais

Précision : Écart intra-laboratoire (Intra-laboratoire / Intra-laboratoire) < 3 %, entre laboratoires (Entre laboratoires / Entre laboratoires) < 5 %.

Biais : peut être causé par une irrégularité de surface ou un écart de charge, nécessitant un contrôle de la qualité de la surface et un étalonnage de l'équipement.

10. Annexes

Annexe A : Tableau de conversion de la dureté, se référer à la norme ISO 18265.

Annexe B : Diagramme de mesure de l'indentation.

11. Applicabilité et limites

Applicabilité : Convient aux tests de dureté des matériaux métalliques et des revêtements par projection thermique, largement utilisés dans le contrôle qualité.

Limites:

Ne convient pas aux matériaux non métalliques (tels que la céramique, non frittée).

Les revêtements minces $< 0,5$ mm d'épaisseur doivent être utilisés avec prudence et une micro-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

charge peut être nécessaire.



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 9227:2017 Essais de corrosion en atmosphère artificielle

— Essais au brouillard salin

Essais de corrosion en atmosphère artificielle

— Test au brouillard salin

1. Portée

1.1 La présente Norme internationale spécifie la méthode de réalisation d'essais au brouillard salin (essais au brouillard salin / Salt Spray Tests) en atmosphères artificielles (Artificial Atmospheres / Artificial Atmospheres) pour évaluer la résistance à la corrosion (Corrosion Resistance / Corrosion Resistance) des matériaux métalliques et de leurs revêtements.

Objets applicables : y compris les matériaux métalliques, les revêtements projetés thermiquement (tels que le revêtement en carbure cémenté WC-Co/Cermet), les revêtements électrolytiques et les revêtements organiques.

Objectif : Évaluer la résistance à la corrosion des matériaux ou des revêtements en simulant un environnement de brouillard salin pour le contrôle qualité et la vérification des performances.

1.2 Cette norme comprend trois méthodes d'essai :

Test au brouillard salin neutre (NSS / Neutral Salt Spray Test, NSS).

Test au brouillard salin d'acide acétique (AASS).

Test de brouillard salin d'acide acétique accéléré au cuivre (CASS).

1.3 Cette norme n'est pas destinée à prédire la résistance à la corrosion à long terme des matériaux dans des environnements réels et est destinée uniquement aux essais de comparaison en laboratoire.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent les clauses de cette norme par référence dans cette norme :

ISO 1514:2016 - Peintures et vernis — Panneaux normalisés pour essais

ISO 2808:2019 - Peintures et vernis — Détermination de l'épaisseur du film

ISO 3574:2012 - Tôles d'acier au carbone laminées à froid de qualités commerciales et pour emboutissage

ISO 8044:2015 - Corrosion des métaux et alliages — Termes et définitions de base

ISO 8407:2021 - Corrosion des métaux et alliages — Élimination des produits de corrosion des éprouvettes de corrosion

Remarque : S'il existe une version révisée, la dernière version s'appliquera.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants, dont certains font référence à l'ISO 8044 :

Brouillard salin : Aérosol formé par l'atomisation d'une solution saline (solution saline), utilisé pour simuler un environnement corrosif.

Résistance à la corrosion : Capacité d'un matériau ou d'un revêtement à résister à la corrosion,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

généralement évaluée par l'étendue de la formation de produits de corrosion.

Échantillon : Échantillon d'essai utilisé pour l'essai au brouillard salin.

NSS (Neutral Salt Spray) : Test au brouillard salin utilisant une solution saline neutre (pH 6,5-7,2).

AASS (Acetic Acid Salt Spray) : test au brouillard salin dans lequel de l'acide acétique est ajouté pour abaisser la valeur du pH (3,1-3,3).

CASS (Copper-Acelerated Acetic Acid Salt Spray) : un test au brouillard salin qui ajoute du chlorure de cuivre (chlorure de cuivre) à l'AASS pour accélérer la corrosion.

4. Principes du test

L'échantillon est exposé à un environnement de brouillard salin (environnement de brouillard salin / environnement de brouillard salin), et un aérosol corrosif uniforme (aérosol corrosif / aérosol corrosif) est formé par atomisation de la solution saline (solution saline / solution saline).

L'étendue de la corrosion est évaluée en observant la formation de produits de corrosion (Produits de corrosion / Produits de corrosion), de perte de masse (Perte de masse / Perte de masse) ou de défauts de surface (Défauts de surface / Défauts de surface).

5. Appareil d'essai

Chambre de brouillard salin (chambre de brouillard salin) :

Capacité : ≥ 400 L, assurant une atomisation uniforme.

Matériau : Matériaux résistants à la corrosion, tels que le plastique renforcé de fibre de verre (Fiberglass Reinforced Plastic).

Buse : Matériau non métallique, produit une brume fine uniforme (Fine Mist).

Contrôle de la température : La température dans la chambre d'essai est maintenue à $35 \pm 2^\circ\text{C}$.

Dispositif de collecte : Au moins 2 entonnoirs de collecte pour mesurer le taux de dépôt de brouillard salin.

6. Solution de test

Solution saline :

Ingrédients : Chlorure de sodium (NaCl / chlorure de sodium) concentration 50 ± 5 g/L.

Pureté : impureté NaCl $< 0,5$ %, ne contient pas de cuivre ni de nickel.

Qualité de l'eau : eau distillée ou déionisée, conductivité < 20 $\mu\text{S/cm}$.

Valeur du pH :

NSS : 6,5-7,2.

AASS : 3,1-3,3 (ajusté par ajout d'acide acétique).

CASS : 3,1-3,3 (ajouter $0,26 \pm 0,02$ g/L de chlorure de cuivre).

7. Préparation des échantillons

Dimensions de l'échantillon : recommandées $150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times$ épaisseur, conformément à la norme ISO 1514.

Préparation :

Élimine les taches d'huile (Contaminants / Taches d'huile) et le tartre d'oxyde (Oxyde Scale / Oxyde Scale).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Revêtement par projection thermique : rugosité de surface Ra 3-5 μm , selon la norme ISO 8501-1.

Quantité : ≥ 3 échantillons par groupe, tests représentatifs.

Positionnement : L'échantillon doit être placé à un angle de 15°-30° par rapport à la verticale pour éviter la pulvérisation directe.

8. Conditions d'essai

Température : $35\pm 2^\circ\text{C}$ dans la chambre d'essai.

Taux de dépôt de brouillard salin : $1-2\text{ mL} / (80\text{ cm}^2 \cdot \text{h})$.

Durée du test :

NSS : 24 h, 48 h, 96 h, 240 h, 480 h ou 720 h.

AASS et CASS : 24 h, 48 h ou 96 h.

Humidité : Humidité relative : 95 %-100 %.

9. Procédure de test

Préparation

Préparez une solution saline et ajustez le pH.

Préchauffer la chambre d'essai à 35°C .

Essai:

Placez l'échantillon dans la chambre d'essai et démarrez le brouillard salin.

Vérifiez le taux de sédimentation et la température toutes les 24 heures.

Achèvement:

Après le test, l'échantillon est lavé avec de l'eau distillée pour éliminer le sel (dépôts de sel).

Élimination des produits de corrosion (Corrosion Products / Produits de corrosion) selon la norme ISO 8407.

10. Méthodes d'évaluation

Inspection visuelle : Observer la répartition des produits de corrosion, des taches de rouille et du pelage du revêtement.

Perte de masse : La perte de masse d'un échantillon avant et après le test est mesurée en g/m^2 .

Indice de corrosion : évalué selon la norme ISO 8407, comme aucune corrosion, légère corrosion, etc.

11. Rapport d'essai

Contenu

Informations sur le matériau de l'échantillon et le revêtement (par exemple, revêtement WC-Co, substrat en acier).

Méthode d'essai (méthode d'essai, telle que NSS).

Conditions d'essai : Température, vitesse de sédimentation, temps.

Résultats de l'évaluation : Degré de corrosion, perte de masse, photos.

Date du test (Date / Date du test), Opérateur (Opérateur / Opérateur) et Numéro d'équipement (Numéro d'équipement / Numéro d'équipement).

Exemple : Revêtement WC-Co, test NSS 480 h, légère corrosion superficielle (Slight Corrosion),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

perte de masse 2,5 g/ m² .

12. Précision et biais

Précision : Écart intra-laboratoire (Intra-laboratoire / Intra-laboratoire) < 10 %, entre laboratoires (Entre laboratoires / Entre laboratoires) < 15 %.

Biais : peut être affecté par l'uniformité de la pulvérisation ou la position de l'échantillon, et la distribution de la pulvérisation doit être contrôlée.

13. Annexes

Annexe A (Annexe A) : Directives de conception de la chambre de brouillard salin (Directives de conception de la chambre de brouillard salin).

Annexe B (Annexe B / Annexe B) : Matériaux de référence standard (Matériaux de référence standard / Matériaux de référence standard).

14. Applicabilité et limites

Applicabilité : Applicable aux tests de résistance à la corrosion des matériaux et revêtements métalliques, largement utilisé dans le contrôle qualité.

Limites:

Ne convient pas pour prédire la résistance à la corrosion à long terme dans des environnements réels. Soyez prudent avec les revêtements non métalliques et un ajustement des conditions de test peut être nécessaire.

Résumé

La norme ISO 9227:2017 « Essais de corrosion en atmosphère artificielle — Essais au brouillard salin » fournit des méthodes normalisées pour les essais au brouillard salin (NSS, AASS, CASS), qui conviennent à l'évaluation de la résistance à la corrosion des matériaux métalliques et des revêtements par projection thermique (tels que les revêtements en carbure cémenté).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ASTM B665-01(2014)

Guide standard pour l'identification métallographique de la microstructure des carbures cimentés

Guide standard pour l'identification métallographique des microstructures en carbure cimenté

1. Portée

1.1 Ce guide standard spécifie les méthodes d'identification métallographique de la microstructure des carbures cimentés à des fins de contrôle qualité et de recherche.

Objets applicables : Les matériaux composites à base de carbure de tungstène (WC) (tels que WC-Co), de carbure de titane (TiC) et de carbure de tantale (TaC) sont largement utilisés dans les revêtements par projection thermique (revêtements par projection thermique) et les outils de coupe.

Objectif : Fournir une méthode standardisée pour caractériser les microstructures et identifier la structure de phase, la porosité et les défauts.

1.2 Cette spécification s'applique aux carbures cimentés frittés (frittés) ou projetés thermiquement (projection thermique).

1.3 Cette norme ne couvre pas les essais de propriétés mécaniques (essais de propriétés mécaniques) du carbure cimenté.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent les clauses de cette norme par référence dans cette norme :

ASTM E3-11(2017) - Guide standard pour la préparation d'échantillons métallographiques

ASTM E7-15 - Terminologie normalisée relative à la métallographie

ASTM E407-07(2015)e 1 - Pratique standard pour la microgravure des métaux et alliages

Remarque : S'il existe une version révisée, la dernière version s'appliquera.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants, en référence à la norme ASTM E7 :

Carbure cimenté : Matériau composite constitué de carbures (tels que le WC) et d'une phase liante métallique (telle que le Co) par frittage.

Microstructure : La structure de phase interne et les caractéristiques des défauts d'un matériau observées au microscope.

Porosité : Les vides dans le carbure cimenté sont divisés en type A (petits pores), type B (pores moyens) et type C (grands pores).

Phase liante (Binder Phase) : Tel que le Cobalt (Cobalt) ou le Nickel (Ni), qui lie les particules de carbure.

Gravure : Procédé de révélation de caractéristiques microstructurales par des moyens chimiques ou

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

électrochimiques.

4. Principes d'identification des microstructures

Grâce à la préparation métallographique (Préparation métallographique / Préparation métallographique) et à la gravure (Gravure / Gravure), la structure de phase (Structure de phase / Structure de phase), la granulométrie (Grain Size / Taille de grain) et les défauts (Défauts / Défauts) du carbure cémenté sont observés à l'aide d'un microscope optique (Microscope optique / Microscope optique) ou d'un microscope électronique à balayage (MEB / Microscope électronique à balayage).

5. Préparation des échantillons

Sectionnement : Utiliser une scie diamantée et éviter la surchauffe.

Meulage : Utilisez du papier de verre SiC (papier au carbure de silicium), du grossier (#120) au fin (#1200).

Polissage : Utiliser une suspension diamantée (suspension diamantée, granulométrie 1 μm) pour obtenir une finition miroir.

Gravure:

Réactif recommandé : réactif de Murakami (10 g $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ + 10 g KOH + 100 mL H_2O), temps de gravure 5-15 secondes.

Méthode alternative : Gravure électrolytique (Electrolytic Etching) utilisant une solution HCl à 10 %.

Nettoyage : Nettoyer à l'éthanol (Ethanol), sécher (Dry).

6. Examen microscopique

Matériel : Microscope optique (Grossissement 50-1000 fois) ou MEB.

Paramètres d'observation

Taille des grains de carbure : Mesurée selon la norme ASTM E112.

Porosité : Classée en types A, B et C, se référer à la norme ISO 4505.

Défauts : tels que fissures et inclusions.

Grossissement : 100 à 500 fois recommandé, selon la taille des particules.

7. Classification des microstructures

Structure de phase

WC-Co : particules de carbure de tungstène (WC Grains / particules de carbure de tungstène) et liant cobalt (Co Binder / liant cobalt).

Alliages multiphasés : Contient du TiC ou du TaC .

Catégorie granulométrique :

Ultra-fin : $\leq 0,5 \mu\text{m}$.

Fin : $0,5-2 \mu\text{m}$.

Milieu : $2-5 \mu\text{m}$.

Grossier : $>5 \mu\text{m}$.

Degré de porosité :

A00-A04 : Petits pores.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

B00-B 04 : Pores moyens (Pores moyens / Pores moyens).

C00-C04 : Gros pores.

8. Rapport

Contenu

Matériau de l'échantillon : tel que revêtement WC-12Co, substrat.

Méthode de préparation : telle que la projection thermique (HVOF).

Caractéristiques de la microstructure : granulométrie, porosité, défauts.

Conditions de gravure : Réactifs et temps.

Photographies et agrandissement.

Date du test (Date / Test date), opérateur (Operator / Operator) et numéro d'équipement (Equipment Number / Equipment Number).

Exemple : revêtement WC-12Co, granulométrie 2 μ m , porosité A02, grossissement 200x, pas de fissures.

9. Précision et biais

Précision : Écart intra-laboratoire (Intra-laboratoire / Intra-laboratoire) < 5 %, entre laboratoires (Entre laboratoires / Entre laboratoires) < 10 %.

Biais : Peut être dû à une préparation inégale ou à une surgravure. La qualité de la préparation doit être contrôlée.

10. Annexes

Annexe A : Préparation du réactif de Murakami.

Annexe B : Exemples d'examen microscopique.

11. Applicabilité et limites

Applicabilité : Convient au contrôle qualité et à la recherche de microstructures en carbure cémenté, en particulier pour les revêtements par projection thermique.

Limites:

Ne convient pas aux matériaux sans carbure.

Pour les revêtements ultra-minces (< 0,1 mm), la méthode de préparation doit être ajustée.

Résumé

La norme ASTM B665-01(2014) « Guide standard pour l'identification métallographique de la microstructure dans les carbures cémentés / Guide standard pour l'identification métallographique de la microstructure dans les carbures cémentés » fournit des méthodes d'identification microstructurale des carbures cémentés (tels que les revêtements WC-Co projetés thermiquement), y compris la préparation, la corrosion et l'examen microscopique, qui conviennent au contrôle qualité et à la recherche.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ASTM E2283-08 (2019)

Pratique standard pour l'analyse des valeurs extrêmes des inclusions non métalliques dans l'acier et d'autres caractéristiques microstructurales Pratique standard pour l'analyse des valeurs extrêmes des inclusions non métalliques dans l'acier et d'autres caractéristiques microstructurales

1. Portée

1.1 Cette pratique standard fournit une méthode pour estimer la taille maximale (taille maximale) des inclusions non métalliques (inclusions non métalliques) ou d'autres caractéristiques microstructurales (caractéristiques microstructurales) dans l'acier à l'aide d'une analyse statistique des valeurs extrêmes.

Objets applicables : acier, carbures cémentés (tels que les revêtements par projection thermique WC-Co) et autres matériaux métalliques, en mettant l'accent sur l'analyse des inclusions non métalliques, de la porosité ou des microdéfauts.

Objectif : Prédire la taille de la plus grande inclusion ou du plus grand défaut dans un matériau par des méthodes statistiques permettant d'évaluer les propriétés du matériau (telles que la durée de vie en fatigue) et le contrôle qualité.

1.2 La présente norme s'applique aux caractéristiques microstructurales observées au microscope métallographique (microscopie métallographique).

1.3 Cette norme n'implique pas de tests de propriétés mécaniques (Tests de propriétés mécaniques / Tests de propriétés mécaniques) et fournit uniquement des méthodes d'analyse statistique.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent les clauses de cette norme par référence dans cette norme :

ASTM E3-11(2017) - *Guide standard pour la préparation d'échantillons métallographiques*

ASTM E7-15 - *Terminologie normalisée relative à la métallographie*

ASTM E45-18 - *Méthodes d'essai normalisées pour déterminer la teneur en inclusions de l'acier*

ASTM E112-13 - *Méthodes d'essai normalisées pour la détermination de la granulométrie moyenne*

Remarque : S'il existe une version révisée, la dernière version s'appliquera.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants, en référence à la norme ASTM E7 :

Inclusions non métalliques : Phases non métalliques (telles que les oxydes, les sulfures) dans l'acier ou d'autres matériaux métalliques.

Analyse des valeurs extrêmes : méthode statistique utilisée pour prédire la distribution des inclusions ou des défauts de plus grande taille dans un échantillon.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zone de contrôle : Zone de mesure définie lors de l'observation au microscope, en mm^2 .

Taille maximale : La dimension linéaire maximale d'une inclusion ou d'un défaut, en μm .

Distribution de Gumbel : un modèle de distribution statistique utilisé pour l'analyse des valeurs extrêmes.

4. Principes de l'analyse des valeurs extrêmes

L'observation métallographique est utilisée pour mesurer la taille de la plus grande inclusion ou du plus grand défaut dans plusieurs zones de contrôle.

Ajustez les données à l'aide de la distribution des valeurs extrêmes de Gumbel (distribution des valeurs extrêmes de Gumbel) pour prédire la taille probable de la plus grande inclusion ou du plus grand défaut dans un plus grand volume de matériau.

5. Préparation des échantillons

Sectionnement : Utiliser une scie diamantée pour éviter d'introduire des défauts supplémentaires.

Meulage : Utilisez du papier de verre SiC (papier au carbure de silicium), du grossier (#120) au fin (#1200).

Polissage : Utiliser une suspension diamantée (suspension diamantée, granulométrie $1\ \mu\text{m}$) pour obtenir une finition miroir.

Gravure (facultatif) : Utiliser un réactif approprié (par exemple 2 % d'acide nitrique/Nital pour l'acier) pour révéler les inclusions ou la microstructure.

Nettoyage : Nettoyer à l'éthanol (Ethanol), sécher (Dry).

6. Procédure de mesure

Matériel : Microscope optique ou microscope électronique à balayage (MEB), grossissement 100-500x.

Zone de contrôle :

Pour chaque échantillon, mesurez au moins 30 zones de contrôle (minimum 30 zones).

Surface recommandée : $0,1\ \text{mm}^2$ à $1\ \text{mm}^2$, selon la densité d'inclusion.

Mesures:

Dans chaque zone de contrôle, enregistrez la taille de l'inclusion ou du défaut le plus important (taille maximale de l'inclusion).

Mesurer la dimension linéaire maximale de l'inclusion (Dimension Linéaire Maximale / Dimension Linéaire Maximale) en μm .

Enregistrement : organise les données de plus grande taille par ordre croissant en vue de l'analyse des valeurs extrêmes.

7. Méthode d'analyse des valeurs extrêmes

Ajustement des données :

Ajuster les données de taille maximale à une distribution de Gumbel (distribution de Gumbel / distribution de Gumbel).

Fonction de distribution cumulative de la distribution de Gumbel :

$F(x) = \exp(-\exp(-(x-\lambda)/\delta))$ où λ est le paramètre de localisation et δ est le paramètre d'échelle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Estimation des paramètres

Estimez λ et δ en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance (MLM) ou la méthode des moindres carrés (Least Squares Method).

Prédiction:

Calcule la taille d'inclusion maximale dans un volume spécifié (volume spécifié) à un niveau de confiance spécifié (par exemple 95 %).

Formule : $x_p = \lambda - \delta \times \ln(-\ln(p))$, où p est la probabilité (Probabilité / probabilité).

8. Rapport

Contenu

Matériau de l'échantillon : Par exemple, revêtement en acier ou en WC-Co.

Méthode de préparation : telle que la projection thermique (HVOF).

Zone de contrôle (Control Area) et nombre de mesures (Number of Measurements).

Données de taille maximale (Données de taille maximale / Données de taille maximale) et paramètres de distribution de Gumbel (Paramètres de Gumbel / Paramètres de Gumbel).

Taille d'inclusion maximale prévue.

Photographies et agrandissement.

Date du test (Date / Test date), opérateur (Operator / Operator) et numéro d'équipement (Equipment Number / Equipment Number).

Exemple : revêtement WC-Co, zone de contrôle 0,5 mm², 30 zones, taille d'inclusion maximale prévue 50 μ m (niveau de confiance de 95 %), grossissement 200x.

9. Précision et biais

Précision : Écart intra-laboratoire (Intra-laboratoire / Intra-laboratoire) < 10 %, entre laboratoires (Entre laboratoires / Entre laboratoires) < 15 %.

Biais : peut être causé par une préparation inégale de l'échantillon (irrégularité de la préparation) ou une distribution d'inclusion inégale (distribution d'inclusion), et nécessite d'augmenter le nombre de zones de mesure.

10. Annexes

Annexe A : Exemple d'ajustement de distribution Gumbel.

Annexe B : Directives pour la mesure de la taille des inclusions.

11. Applicabilité et limites

Applicabilité : Convient à l'analyse des valeurs extrêmes des inclusions ou des défauts dans l'acier, le carbure cémenté et d'autres matériaux. Largement utilisé en contrôle qualité et en analyse de fatigue.

Limites:

Un nombre suffisant de zones de contrôle est nécessaire pour garantir la fiabilité statistique.

Ne convient pas aux matériaux à très faible densité d'inclusion.

Résumé

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La norme ASTM E2283-08(2019) « Pratique standard pour l'analyse des valeurs extrêmes des inclusions non métalliques dans l'acier et d'autres caractéristiques microstructurales / Pratique standard pour l'analyse des valeurs extrêmes des inclusions non métalliques dans l'acier et d'autres caractéristiques microstructurales » fournit une méthode pour évaluer la taille maximale des inclusions ou des défauts dans l'acier ou le carbure cémenté (tel que le revêtement WC-Co pulvérisé thermiquement) à l'aide d'une analyse statistique des valeurs extrêmes, qui convient au contrôle qualité et à l'évaluation des performances.

appendice:

EN 13204:2017

Projection thermique — Poudres — Composition, conditions techniques de fourniture

Projection thermique - Poudres - Composition, conditions techniques de fourniture

1. Portée

1.1 La présente norme spécifie la composition (Composition / composition) et les conditions techniques d'approvisionnement (Technical Supply Conditions / technical supply conditions) des poudres (Powders / Powders) utilisées dans le procédé de projection thermique.

Objets applicables : y compris les poudres métalliques (telles que le nickel et le cobalt), les poudres céramiques (telles que l'alumine), les poudres de carbure (telles que le cermet WC-Co) et les poudres composites.

Objectif : garantir que la poudre répond aux exigences du processus de projection thermique pour le contrôle qualité et l'optimisation des performances.

1.2 Cette norme s'applique à la projection à la flamme, à la projection au plasma, au HVOF et à d'autres procédés.

1.3 La présente norme ne couvre pas le procédé de fabrication des poudres (Procédé de fabrication des poudres / Procédé de préparation des poudres), mais spécifie uniquement les conditions d'approvisionnement.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent les clauses de cette norme par référence dans cette norme :

EN 657:2005 - *Projection thermique — Terminologie, classification*

EN 820-1:2002 - *Céramiques techniques avancées — Méthodes d'essai des céramiques monolithiques — Partie 1 : Détermination de la masse volumique et de la porosité*

EN ISO 3252:1999 - *Métallurgie des poudres — Vocabulaire*

Remarque : S'il existe une version révisée, la dernière version s'appliquera.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants, en référence aux normes EN 657 et EN ISO 3252 :

Poudre de projection thermique : Matériau granulaire utilisé dans le processus de projection thermique.

Distribution granulométrique : La plage et la proportion des diamètres des particules de poudre, exprimées en μm .

Composition chimique : Teneur de chaque élément dans la poudre, exprimée en % en poids.

Fluidité : Temps nécessaire à une poudre pour passer à travers un entonnoir standard dans des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conditions spécifiées, exprimé en secondes pour 50 g.

Masse volumique apparente : Masse volumique d'une poudre à l'état libre, exprimée en g/cm³.

4. Exigences techniques

4.1 Composition chimique/Composition chimique

Exigences:

Le contenu de chaque élément doit être conforme aux spécifications de la commande (Order Specifications).

Teneur en impuretés (impuretés) ≤ 0,5 % (sauf indication contraire).

Méthodes d'essai

Analyse spectroscopique (se référer à la norme EN ISO 10378).

Teneur en oxygène/azote : mesurée à l'aide de la méthode de fusion infrarouge.

4.2 Distribution granulométrique

Exigences:

La plage de tailles de particules (Plage de tailles de particules / Plage de tailles de particules) est spécifiée par le donneur d'ordre, par exemple 10-45 μ m , 15-53 μ m .

La distribution granulométrique doit être uniforme (Uniform Distribution / Uniform Distribution) et conforme au test au tamis (Sieve Analysis / Sieve Test).

Méthodes d'essai

Analyse par diffraction laser (Analyse par diffraction laser, voir EN ISO 13320).

Tamissage standard / Tamissage standard.

4.3 Fluidité

Exigences:

Fluidité ≤ 30 s/50g (valeur spécifique précisée par le donneur d'ordre).

Méthodes d'essai

Utiliser un débitmètre à effet Hall (se référer à la norme EN ISO 4490).

4.4 Densité apparente

Exigences:

La plage de densité apparente est spécifiée par le donneur d'ordre, par exemple 2,5-4,5 g/cm³ (selon le type de poudre).

Méthodes d'essai

Méthode de la coupe à écoulement Hall (méthode de la coupe à écoulement Hall , voir EN ISO 3923-1).

4.5 Morphologie et pureté

Exigences:

La morphologie de la poudre est soit sphérique, soit irrégulière, selon le procédé.

Pureté : ≥ 99 % (sauf indication contraire).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Méthodes d'essai

La microscopie électronique à balayage (MEB/microscope électronique à balayage) a été utilisée pour observer la morphologie.

Détection d'impuretés par fluorescence X (XRF / X-ray Fluorescence).

5. Emballage et marquage

Emballage :

Utilisez des récipients scellés tels que des seaux en plastique ou des boîtes en métal pour éviter l'humidité et la contamination.

Poids net : 5 kg, 10 kg ou selon les exigences de la commande.

Marquage:

Nom du produit : Par exemple, WC-12Co.

Numéro de lot (Batch Number) et date de production (Production Date).

Nom du fabricant (Nom du fabricant) et consignes de sécurité (Consignes de sécurité).

6. Inspection et essais

Types d'inspection :

Contrôle de type : Pour les nouveaux produits ou les nouveaux lots.

Inspection des lots : Chaque lot de produits.

Méthodes d'essai

Détermination de la masse volumique et de la porosité en référence à la norme EN 820-1.

Analyse de la composition chimique selon la norme EN ISO 10378.

Échantillonnage:

La quantité d'échantillon de chaque lot (quantité d'échantillon / volume d'échantillonnage) est ≥ 200 g, conformément à la norme EN ISO 14284.

7. Rapport

Contenu

Description du produit : Tel que la poudre WC-12Co.

Composition chimique : C 5,2 %, Co 12,0 %.

Distribution granulométrique : 10-45 μ m .

Fluidité : 25 s/50g.

Densité apparente : 4,0 g/ cm³ .

Date d'inspection (Date d'inspection), numéro de lot (Numéro de lot) et informations sur le fabricant (Informations sur le fabricant).

Exemple

Poudre de WC-12Co, C 5,2%, granulométrie 10-45 μ m , fluidité 24 s/50g, conforme aux exigences de la norme EN 13204:2017.

8. Précision et biais

Précision : Écart intra-laboratoire (Intra-laboratoire / Intra-laboratoire) < 5 %, entre laboratoires (Entre laboratoires / Entre laboratoires) < 10 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Biais : peut être dû à la représentativité de l'échantillon ou à des variations des conditions de test, nécessitant un contrôle strict de l'échantillonnage et des tests.

9. Applicabilité et limites

Applicabilité : Convient à l'approvisionnement et au contrôle qualité des poudres de projection thermique, en particulier pour les poudres de carbure cémenté (telles que WC-Co).

Limites:

Aucun processus de préparation de poudre n'est impliqué.

Un accord supplémentaire est requis pour les poudres destinées à des fins spéciales.

Résumé

EN 13204:2017 Projection thermique — Poudres — Composition, conditions techniques d'approvisionnement fournit les exigences de composition et de conditions d'approvisionnement pour les poudres de projection thermique (telles que les poudres de carbure cémenté WC-Co), y compris la composition chimique, la distribution granulométrique et la fluidité, ce qui est adapté au contrôle de la qualité et à l'optimisation des processus.

appendice:

GB/T 5242-2007

Projection thermique — Fils et tiges Projection thermique - Fil et tige

1. Portée

1.1 La présente norme spécifie les exigences techniques, les règles d'inspection et les conditions de livraison des fils et des tiges utilisés dans le procédé de projection thermique.

Objets applicables : y compris les fils métalliques purs (tels que le zinc, l'aluminium), les fils en alliage (tels que ceux à base de nickel, à base de cobalt) et les matériaux composites (tels que les fils liés au carbure cémenté WC-Co/cermet WC-Co).

Objectif : garantir que les fils et les tiges répondent aux exigences des procédés de projection thermique (tels que la projection à la flamme, la projection au plasma) pour le contrôle qualité et l'assurance des performances.

1.2 La présente norme s'applique aux procédés tels que la projection à l'arc (Arc Spraying / Arc Spraying) et la projection à la flamme (Flame Spraying / Flame Spraying).

1.3 La présente norme ne couvre pas le procédé de fabrication des fils et des barres. Elle spécifie uniquement les spécifications techniques et les exigences d'inspection.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent les clauses de cette norme par référence dans cette norme :

GB/T 1267-2007 - *Méthodes d'échantillonnage de l'acier et de la fonte — Essais et analyses de découpe / Méthodes d'échantillonnage de l'acier et de la fonte — Essais et analyses de découpe*

GB/T 223 - *Méthodes d'analyse chimique du fer, de l'acier et des alliages / Méthodes d'analyse chimique du fer, de l'acier et des alliages*

GB/T 4340.1-2009 - *Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers — Partie 1 : Méthode d'essai*

Remarque : S'il existe une version révisée, la dernière version s'appliquera.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Fil : Filament continu d'un diamètre de 0,8 à 4,0 mm utilisé pour la projection thermique.

Tige : Une tige ou une barre courte d'un diamètre de 4,0 à 10,0 mm.

Composition chimique : Teneur en chaque élément d'un fil ou d'une tige métallique, exprimée en % en poids .

Qualité de surface : Propreté de la surface et défauts (tels que fissures et rayures).

Dureté : Capacité du matériau à résister à la déformation plastique locale, mesurée en HV.

4. Exigences techniques

4.1 Composition chimique/Composition chimique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Exigences:

Le contenu de chaque élément doit être conforme aux spécifications de la commande (Order Specifications).

Teneur en impuretés (impuretés) $\leq 0,5\%$ (sauf indication contraire).

Méthodes d'essai

Analyse spectroscopique (Analyse spectroscopique / Analyse spectroscopique, se référer à GB/T 223).

Teneur en oxygène/azote : méthode de fusion infrarouge.

4.2 Dimensions et tolérances

Diamètre:

Fil métallique : 0,8-4,0 mm, tolérance $\pm 0,05$ mm.

Tige : 4,0-10,0 mm, tolérance $\pm 0,1$ mm.

Longueur (Longueur / Longueur) :

Fil : Disponible en approvisionnement continu ou en longueurs commandées.

Tige : 500-1000 mm, tolérance ± 5 mm.

Méthodes d'essai

Mesurer avec un pied à coulisse (Vernier Caliper) ou un micromètre (Micrometer).

4.3 Qualité de surface

Exigences:

Il n'y a pas de fissures (Cracks / Cracks), de rayures (Scratches / Scratches) ou de tartre d'oxyde (Oxide Scale / Oxide Scale) sur la surface.

Propreté (Cleanliness) conforme à la norme GB/T 1267.

Méthodes d'essai

Inspection visuelle (Visual Inspection) ou loupe à faible puissance (Low-Power Loupe).

4.4 Dureté

Exigences:

La plage de dureté est spécifiée par le donneur d'ordre, par exemple HV 200-600 (selon le matériau).

Méthodes d'essai

Essai de dureté Vickers (Vickers Hardness Test / Vickers Hardness Test, se référer à GB/T 4340.1), charge 5-10 N.

4.5 Rectitude

Exigences:

Courbure par mètre ≤ 1 mm.

Méthodes d'essai

Placez-le sur une surface plane et mesurez l'écart maximal.

5. Emballage et marquage

Conditionnement:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Utilisez des emballages résistants à l'humidité tels que des sacs en plastique ou des contenants hermétiques.

chaque bobine ou paquet pèse 5 à 20 kg ou selon la commande.

Marquage:

Nom du produit : tel que le fil NiAl.

Numéro de lot (Batch Number / Numéro de lot), Date de production (Production Date / Date de production).

Nom du fabricant (Nom du fabricant) et consignes de sécurité (Consignes de sécurité).

6. Inspection et essais

Types d'inspection :

Contrôle de type : Pour les nouveaux produits ou les nouveaux lots.

Inspection des lots : Chaque lot de produits.

Méthodes d'essai

La composition chimique est conforme à la norme GB/T 223.

Les dimensions et la qualité de surface sont déterminées par une inspection visuelle et des outils de mesure.

La dureté est conforme à la norme GB/T 4340.1.

Échantillonnage:

La quantité d'échantillonnage de chaque lot (quantité d'échantillon / quantité d'échantillonnage) ≥ 1 m (fil) ou 1 pièce (tige), conformément à la norme GB/T 1267.

7. Rapport

Contenu

Description du produit : Fil NiAl, diamètre 1,6 mm.

Composition chimique : Ni 50 %, Al 50 %.

Dimensions : Diamètre 1,60 \pm 0,05 mm.

Dureté : HV 250 \pm 20.

Qualité de surface : Aucun défaut.

Date d'inspection (Date d'inspection), numéro de lot (Numéro de lot) et informations sur le fabricant (Informations sur le fabricant).

Exemple

Fil NiAl, diamètre 1,6 mm, composition chimique Ni 50,2%, Al 49,6%, dureté HV 245, sans défaut de surface, conforme à GB/T 5242-2007.

8. Précision et biais

Précision : Écart intra-laboratoire (Intra-laboratoire / Intra-laboratoire) < 5 %, entre laboratoires (Entre laboratoires / Entre laboratoires) < 10 %.

Biais : peut être dû à la représentativité de l'échantillon ou à des variations des conditions de test, nécessitant un échantillonnage et un contrôle environnemental.

9. Applicabilité et limites

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Applicabilité : Convient à la fourniture et au contrôle qualité de fils et de tiges pour la projection thermique, en particulier pour les matériaux à base de carbure cimenté.

Limites:

Aucun processus de fabrication n'est impliqué.

Pour les fils à usage spécial, un accord supplémentaire est requis.

Résumé

La norme GB/T 5242-2007 « Projection thermique — Fils et tiges / Projection thermique — Fils et tiges métalliques » fournit des exigences techniques et des règles d'inspection pour les fils et tiges métalliques destinés à la projection thermique (tels que les matériaux apparentés au NiAl ou au WC-Co), qui s'appliquent aux applications de contrôle qualité et de processus.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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:

GB/T 3489-2012

Projection thermique — Examen métallographique des revêtements projetés thermiquement

Projection thermique - Contrôle métallographique des revêtements projetés thermiquement

1. Portée

1.1 La présente norme spécifie les méthodes d'examen métallographique des revêtements par projection thermique à utiliser pour le contrôle de la qualité et l'évaluation des performances.

Objets applicables : y compris les revêtements métalliques (tels que le nickel et le cobalt), les revêtements céramiques (tels que l'alumine) et les revêtements en carbure (tels que le WC-Co Cermet).

Objectif : Évaluer la microstructure, la porosité, la force de liaison et les défauts des revêtements par observation microscopique.

1.2 La présente norme s'applique aux procédés de projection à la flamme, de projection au plasma et de HVOF.

1.3 La présente norme ne couvre pas les essais de propriétés mécaniques des revêtements, mais fournit uniquement des méthodes d'examen métallographique.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent les clauses de cette norme par référence dans cette norme :

GB/T 1267-2007 - *Méthodes d'échantillonnage de l'acier et de la fonte — Essais et analyses de découpe / Méthodes d'échantillonnage de l'acier et de la fonte — Essais et analyses de découpe*

GB/T 13298-2015 - *Méthodes d'inspection de la microstructure des métaux*

GB/T 4338-2006 - *Matériaux métalliques — Essai de traction à température ambiante*

Remarque : S'il existe une version révisée, la dernière version s'appliquera.

3. Termes et définitions

Cette norme adopte les termes et définitions suivants, en référence à GB/T 13298 :

Revêtement par projection thermique : Revêtement déposé sur un substrat par un procédé de projection thermique.

Microstructure : structure de phase, granulométrie et caractéristiques des défauts dans le revêtement.

Porosité : Pourcentage volumique de pores (Pores) dans un revêtement, exprimé en %.

Interface de liaison : zone de connexion entre le revêtement et le substrat.

Gravure : Procédé de révélation de la microstructure par des moyens chimiques ou électrochimiques.

4. Préparation des échantillons

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sectionnement :

Utilisez une scie diamantée pour couper et éviter la surchauffe ou les dommages.

Taille de l'échantillon : 20 mm × 10 mm × épaisseur du revêtement + 5 mm sont recommandés.

Montage:

Incorporer avec de la résine époxy (Résine époxy / Résine époxy) ou de la résine phénolique (Résine phénolique / Résine phénolique) pour protéger le bord du revêtement (Bord de revêtement / Bord de revêtement).

Affûtage:

Utilisez du papier de verre SiC (papier au carbure de silicium / papier de verre au carbure de silicium), du grossier (#120) au fin (#1200).

Polissage:

Utiliser une suspension diamantée (Diamond Suspension / Diamond Suspension, granulométrie 1 μ m) pour obtenir une finition miroir (Mirror Finish / Mirror Finish).

Gravure:

Revêtement métallique : acide nitrique 2% (Nital / acide nitrique), temps de corrosion 5-10 secondes.

Revêtements céramique/carbure : réactif de Murakami (10 g $K_3 [Fe(CN)_6]$ + 10 g KOH + 100 mL H_2O), temps de gravure 10-20 secondes.

5. Examen microscopique

Équipement:

Microscope optique (microscope optique / microscope optique), grossissement (grossissement / grossissement) 50-1000 fois.

Microscope électronique à balayage (MEB / Balayage Electron Microscope) pour l'observation à haute résolution (High-Resolution Observation / High-Resolution Observation).

Paramètres d'observation

Microstructure : distribution des phases, granulométrie.

Porosité : calculée par Analyse d'Image (Image Analysis), unité : %.

Interface de liaison : Observez les fissures (fissures) ou les zones non fusionnées (zones non collées).

Défauts : tels que des inclusions et des pores de gaz.

Grossissement:

Structure globale : 50 à 200 fois.

Détails : 500 à 1 000 fois.

6. Critères d'évaluation

Porosité:

Revêtement métallique : $\leq 5\%$ (valeur recommandée).

Revêtement céramique/carbure : $\leq 2\%$ (valeur recommandée).

Qualité de la liaison :

Il n'y a pas de fissures continues à l'interface de liaison (pas de fissures continues).

Zone non liée (Zone non liée) $\leq 5\%$.

des défauts :

Mineur : Petits défauts dispersés.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Grave : Fissuration ou perte étendue.

7. Rapport

Contenu

Matériau de revêtement : tel que WC-12Co.

Méthode de préparation : telle que la projection thermique HVOF.

Microstructure : distribution des phases, taille des particules.

Porosité : Par exemple, 1,5 %.

Interface de liaison : Aucune fissure.

Défauts : Aucun défaut grave.

Photographies et agrandissement.

Date d'inspection (Date d'inspection), opérateur (Opérateur) et numéro d'équipement (Numéro d'équipement).

Exemple

Revêtement WC-12Co, pulvérisation HVOF, porosité 1,2%, aucune fissure à l'interface de liaison, grossissement 200 fois, aucun défaut grave.

8. Précision et biais

Précision : Écart intra-laboratoire (Intra-laboratoire / Intra-laboratoire) < 5 %, entre laboratoires (Entre laboratoires / Entre laboratoires) < 10 %.

Biais : peut être causé par une préparation inégale de l'échantillon (irrégularité de la préparation) ou une surgravure (surgravure), et le processus de préparation doit être contrôlé.

9. Applicabilité et limites

Applicabilité : Convient à l'examen métallographique des revêtements par projection thermique (tels que les revêtements en carbure cémenté WC-Co), largement utilisés dans le contrôle qualité et la recherche.

Limites:

Ne convient pas aux revêtements par projection non thermiques.

Pour les revêtements ultra-minces (< 0,1 mm), la méthode de préparation doit être ajustée.

Résumé

La norme GB/T 3489-2012 « Projection thermique — Examen métallographique des revêtements projetés thermiquement / Projection thermique — Examen métallographique des revêtements projetés thermiquement » fournit des méthodes d'examen métallographique pour les revêtements projetés thermiquement (tels que les revêtements en carbure cémenté WC-Co), y compris la préparation, l'observation et l'évaluation, qui conviennent au contrôle de la qualité et à l'évaluation des performances.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice

GB/T 38511-2020

**Projection thermique — Poudres
— Composition, conditions techniques de fourniture**

**Projection thermique - Poudres - Composition, conditions techniques
de fourniture**

1. Portée

1.1 La présente norme spécifie la composition, les caractéristiques et les conditions techniques d'approvisionnement des poudres utilisées dans le procédé de projection thermique.

Objets applicables : y compris les poudres métalliques (telles que celles à base de nickel, à base de cobalt), les poudres céramiques (telles que l'alumine), les poudres de carbure (telles que le cermet WC-Co) et les poudres composites.

Objectif : garantir que la poudre répond aux exigences du processus de projection thermique pour le contrôle de la qualité et l'optimisation des performances du revêtement.

1.2 La présente norme s'applique aux procédés tels que la projection plasma (Plasma Spraying), la projection à la flamme (Flame Spraying) et les procédés HVOF (High-Velocity Oxygen Fuel).

1.3 La présente norme ne couvre pas le procédé de fabrication des poudres (Powder Manufacturing Process / Powder Manufacturing Process), mais spécifie uniquement ses conditions d'approvisionnement et ses critères d'acceptation.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent les clauses de cette norme par référence dans cette norme :

GB/T 1480-2010 - Poudres métalliques — Détermination de la granulométrie par tamisage à sec

GB/T 1482-2010 - Poudres métalliques — Détermination du temps d'écoulement au moyen d'un entonnoir calibré (débitmètre à effet Hall) / Poudres métalliques — Détermination du temps d'écoulement au moyen d'un entonnoir calibré (débitmètre à effet Hall)

GB/T 31561-2015 - Poudres métalliques — Détermination de la masse volumique apparente

GB/T 19077-2016 - Distribution granulométrique — Méthodes de diffraction laser

Remarque : S'il existe une version révisée, la dernière version s'appliquera.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Poudre de projection thermique : Matériau granulaire utilisé dans le processus de projection thermique.

Composition chimique : Pourcentage massique de chaque élément dans la poudre, exprimé en % en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

poids .

Distribution granulométrique : La plage et la proportion des diamètres des particules de poudre, exprimées en μm .

Fluidité : Temps nécessaire à une poudre pour passer à travers un entonnoir calibré (mesuré en secondes pour 50 g).

Masse volumique apparente : Masse volumique d'une poudre à l'état libre, exprimée en g/cm^3 .

Morphologie des particules : forme des particules de poudre, par exemple sphérique ou irrégulière.

4. Classification

Par type de matériau :

Poudres métalliques : telles que NiCr et CoCr.

Poudres céramiques : telles que Al_2O_3 et ZrO_2 .

Poudres de carbure : telles que WC-Co, Cr_3C_2 - NiCr .

Poudres composites : telles que Ni- Al_2O_3 .

Par gamme de tailles de particules :

Poudre fine : 5-25 μm .

Poudre moyenne : 25-45 μm .

Poudre grossière : 45-90 μm .

5. Exigences techniques

5.1 Composition chimique/Composition chimique

Exigences:

Le contenu de chaque élément doit être conforme aux spécifications de la commande (Order Specifications).

Écart du composant principal : $\pm 0,5\%$ (sauf indication contraire).

Impuretés : $\leq 0,3\%$ (sauf indication contraire).

Méthodes d'essai

Analyse chimique : comme l'ICP-OES (spectrométrie d'émission optique à plasma à couplage inductif).

Teneur en oxygène/azote : méthode de fusion infrarouge.

5.2 Distribution granulométrique

Exigences:

La gamme de tailles de particules doit répondre aux spécifications de commande, telles que 10-45 μm .

Écart de distribution granulométrique (Distribution Deviation) : $\pm 10\%$ (D10, D50, D90).

Méthodes d'essai

Méthode de diffraction laser (méthode de diffraction laser, voir GB/T 19077).

Tamisage à sec (tamisage à sec / Dry Sieving, se référer à GB/T 1480).

5.3 Fluidité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Exigences:

Fluidité ≤ 35 s/50g (valeur spécifique précisée par le donneur d'ordre).

Pour les poudres fines ($< 25 \mu\text{m}$), la fluidité peut ne pas être requise (non requise).

Méthodes d'essai

Débitmètre à effet Hall (débitmètre à effet Hall, voir GB/T 1482).

5.4 Densité apparente

Exigences:

La plage de densité apparente est spécifiée par le donneur d'ordre, par exemple 2,0-5,0 g/cm³ (selon le type de poudre).

Écart : $\pm 0,2$ g/cm³.

Méthodes d'essai

Détermination de la densité apparente (Détermination de la densité apparente / Détermination de la densité apparente, se référer à GB/T 31561).

5.5 Morphologie des particules

Exigences:

La forme des particules doit répondre aux spécifications de la commande, sphérique (sphérique / sphérique) ou quasi-sphérique (quasi-sphérique / quasi-sphérique) est recommandée.

La proportion de particules irrégulières (Particules irrégulières / particules irrégulières) est $\leq 10\%$.

Méthodes d'essai

Observation au microscope électronique à balayage (MEB/microscope électronique à balayage).

5.6 Teneur en humidité

Exigences:

Teneur en humidité $\leq 0,2$ %.

Méthodes d'essai

Méthode de perte par séchage : Sécher à 105°C pendant 2 heures et peser.

6. Règles d'inspection

Types d'inspection :

Inspection d'usine : chaque lot de produits.

Inspection de type : lorsque de nouveaux produits ou processus changent.

Échantillonnage:

La quantité d'échantillonnage de chaque lot (quantité d'échantillon / quantité d'échantillonnage) est ≥ 200 g et les échantillons sont divisés après un mélange uniforme.

Méthode d'échantillonnage : se référer à GB/T 1267.

Règles de jugement

Tous les projets répondent aux exigences et sont qualifiés.

Si un élément échoue, l'ensemble du lot sera considéré comme non qualifié (Non qualifié / Non qualifié), et un rééchantillonnage et une réinspection (Réinspection / Réinspection) peuvent être nécessaires.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7. Emballage, transport et stockage

Conditionnement:

Utilisez des récipients hermétiques, tels que des seaux en plastique ou des boîtes métalliques, pour éviter l'humidité (étanche à l'humidité) et la contamination (anti-contamination / anti-contamination).

Poids : 5 kg, 10 kg ou selon les exigences de la commande.

Marquage:

Nom du produit : Tels que la poudre WC-12Co.

Numéro de lot (Batch Number / Numéro de lot), Date de production (Production Date / Date de production).

Nom du fabricant (Nom du fabricant) et consignes de sécurité (Consignes de sécurité).

Transport:

Évitez les vibrations fortes (Vibration forte / Vibration forte) et les environnements humides (Environnement humide / Environnement humide).

Stockage:

Conserver dans un environnement sec et aéré (Sec and Ventilated Environment / Environnement sec et aéré), température < 30°C, humidité < 60%.

Durée de conservation : Pas plus de 12 mois.

8. Certificat de qualité

Contenu

Nom du produit (Nom du produit) et spécification (Spécification).

Numéro de lot (Batch Number) et date de production (Production Date).

Résultats d'inspection : composition chimique, distribution granulométrique, fluidité, densité apparente, etc.

Déclaration de conformité : Conformément à la norme GB/T 38511-2020.

Informations sur le fabricant (Informations sur le fabricant / Informations sur le fabricant) et signature de l'inspecteur (Signature de l'inspecteur / Signature de l'inspecteur).

9. Précision et biais

Précision : Écart intra-laboratoire (Intra-laboratoire / Intra-laboratoire) < 5 %, entre laboratoires (Entre laboratoires / Entre laboratoires) < 8 %.

Biais : peut être causé par une irrégularité d'échantillonnage ou une variation de l'équipement de test, et les conditions de test doivent être strictement contrôlées.

10. Applicabilité et limites

Applicabilité : Convient à l'approvisionnement et au contrôle qualité des poudres de projection thermique, en particulier pour les poudres de carbure cémenté telles que WC-Co.

Limites:

Aucun processus de fabrication de poudre n'est impliqué.

Un accord supplémentaire est requis pour les poudres destinées à des fins spéciales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Résumé

La norme GB/T 38511-2020 « Projection thermique — Poudres — Composition, conditions techniques d'approvisionnement » décrit la composition, les caractéristiques et les conditions d'approvisionnement des poudres pour projection thermique (telles que les poudres de carbure cémenté WC-Co), notamment leur composition chimique, leur granulométrie, leur fluidité, etc., adaptées au contrôle qualité et à l'optimisation des procédés. Cette norme présente une certaine cohérence avec les normes internationales (telles que l'ISO 14232-1:2017) en termes d'exigences techniques, mais est plus adaptée aux besoins spécifiques du marché chinois.

appendice:

ASME B46.1-2009

Texture de surface (rugosité de surface, ondulation et pose)

Texture de surface (rugosité, ondulation et planéité de la surface)

1. Portée

1.1 La présente norme spécifie la définition, les méthodes de mesure et la représentation des paramètres de la texture de surface telle qu'elle s'applique aux pièces mécaniques, aux revêtements (par exemple les revêtements par projection thermique) et aux surfaces usinées.

Objets applicables : métaux, céramiques, plastiques et composites, tels que le revêtement en carbure cémenté WC-Co.

Objectif : Fournir des normes quantitatives pour la rugosité de surface, l'ondulation et la pose pour guider la conception, la fabrication et le contrôle qualité.

techniques de mesure

avec contact (Contact / contact) et sans contact (Non-Contact / non-contact).

1.3 Cette norme n'implique pas l'analyse de la composition chimique de surface (Composition chimique de surface / Composition chimique de surface) ou de la microstructure (Microstructure / Microstructure).

2. Références normatives

ASME B89.1.10-2001 - Lignes directrices pour l'évaluation des instruments de mesure dimensionnelle

ISO 4287:1997 - Spécification géométrique des produits (GPS) — État de surface : Méthode du profil — Termes, définitions et paramètres d'état de surface

ISO 3274:1996 - Spécification géométrique des produits (GPS) — État de surface : Méthode du profil — Caractéristiques nominales des instruments de contact (stylet)

Remarque : S'il existe une version révisée, la dernière version s'appliquera.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants, en référence à l'ISO 4287 :

Texture de surface : La somme de la rugosité de surface (Surface Roughness), de l'ondulation (Waviness) et de la pose (Lay).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rugosité de surface (Surface Roughness) : Caractéristiques des petites irrégularités de surface, mesurées en μm , avec des paramètres tels que Ra (Arithmetic Average Roughness).

Ondulation : Caractéristique d'une grande rugosité périodique de la surface, avec l'unité μm et le paramètre tel que Wa.

Pose : Motif de texture formé lors du traitement de surface, tel que parallèle, perpendiculaire ou circulaire.

Longueur d'échantillonnage : Longueur de référence utilisée lors de la mesure de la rugosité, en mm.

4. Paramètres de texture de surface

Paramètres de rugosité

Ra (Rugosité Moyenne Arithmétique) : La moyenne arithmétique de la hauteur du profil, en μm .

Rq (Root Mean Square Roughness) : Valeur quadratique moyenne de la hauteur du profil, unité : μm .

Rz (Hauteur maximale du profil) : La différence de hauteur entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil, en μm .

Paramètres d'ondulation

Wa (Arithmetic Average Waviness) : La hauteur moyenne de l'ondulation, en μm .

Wt (Hauteur totale d'ondulation / Total Waviness Height) : La somme de la hauteur maximale du pic et de la profondeur de la vallée la plus basse de l'ondulation, unité : μm .

Paramètres de pose

Indiqué par des symboles tels que « / » (parallèle), « X » (barré) et « C » (circulaire).

5. Méthodes de mesure

Mesure de contact :

Matériel : Profilomètre à stylet, tel que Taylor Hobson ou Mitutoyo.

Stylet : rayon de la pointe 2-5 μm , force de contact $< 0,75\text{ mN}$.

Longueur d'échantillonnage : 0,25 mm, 0,8 mm, 2,5 mm (à sélectionner en fonction du type de surface).

Durée d'évaluation : 5 longueurs d'échantillonnage (5L).

Mesure sans contact :

Équipement : Microscope optique, microscope confocal à balayage laser.

Résolution : $\leq 0,1\ \mu\text{m}$.

Conditions de mesure :

Température : $20\pm 2^\circ\text{C}$.

Humidité : 40-60%.

Nettoyage de surface : Élimination de l'huile et des particules.

6. Représentation de la texture de surface

Symboles :

La valeur de rugosité (Roughness Value / Roughness value) telle que « Ra 0,8 » signifie que la rugosité moyenne arithmétique est de 0,8 μm .

La valeur d'ondulation (Waviness Value) telle que « Wa 2,0 » signifie que la moyenne arithmétique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de l'ondulation est de $2,0 \mu\text{m}$.

Sens du grain (Lay / Grain direction) tel que « / » signifie parallèle.

Représentation graphique :

Utilisez un graphique de profil ou une carte de surface 3D pour le représenter.

Exemple : $R_a 1,6 \mu\text{m}$, Lay « X », $W_a 3,0 \mu\text{m}$.

Dessins techniques

Marqué sur le dessin, conformément à la norme ASME Y14.36.

7. Rapport

Contenu

Description de l'échantillon : par exemple, revêtement par projection thermique WC-Co, substrat en acier.

Méthode de mesure : tel qu'un profilomètre à stylet.

Paramètres de rugosité : $R_a 1,2 \mu\text{m}$, $R_z 6,5 \mu\text{m}$.

Paramètres d'ondulation : $W_a 2,5 \mu\text{m}$.

Sens du grain (Lay / Grain direction) : Parallèle « / ».

Conditions de mesure : Température 20°C , humidité 50%.

Photographies ou graphiques de profil.

Date d'inspection (Date d'inspection), opérateur (Opérateur) et numéro d'équipement (Numéro d'équipement).

Exemple

Revêtement WC-Co, mesure au stylet, $R_a 1,3 \mu\text{m}$, $R_z 7,0 \mu\text{m}$, Lay « / », température 20°C , 31 mai 2025.

8. Précision et biais

Précision : Au sein du laboratoire (répétabilité) $< 5 \%$, entre les laboratoires (reproductibilité) $< 10 \%$.

Biais : peut être affecté par l'usure du stylet, la propreté de la surface ou les conditions environnementales et nécessite un étalonnage de l'équipement et des conditions de contrôle.

9. Applicabilité et limites

Applicabilité : Convient pour la mesure de la texture de surface des pièces mécaniques et des revêtements par projection thermique (tels que les revêtements WC-Co), le guidage du traitement et le contrôle qualité.

Limites:

Ne convient pas à la chimie de surface ou à l'analyse microstructurale.

Des méthodes de mesure spéciales sont nécessaires pour les matériaux très flexibles ou ultra-mous.

Résumé

La norme ASME B46.1-2009 « Texture de surface (rugosité de surface, ondulation et disposition) » fournit des méthodes de mesure et d'expression de la texture de surface, y compris la rugosité, l'ondulation et la direction de la texture, qui conviennent au contrôle qualité et à l'évaluation des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

performances des revêtements par projection thermique (tels que les revêtements WC-Co).



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:

La norme EN 10204:2004 « Produits métalliques — Types de documents de contrôle » est une version mixte en chinois et en anglais de la norme. Elle s'appuie sur la norme officielle publiée par le Comité européen de normalisation (CEN) et s'applique aux exigences relatives aux documents de contrôle des produits métalliques, y compris la vérification des matériaux liés aux carbures cimentés (tels que les revêtements par projection thermique).

EN 10204:2004

Produits métalliques — Types de documents d'inspection Produits métalliques - Types de documents d'inspection

1. Portée

1.1 La présente norme spécifie les documents d'inspection des produits métalliques.

Les types et exigences des documents d'inspection/Documents d'inspection) s'appliquent à l'acceptation de livraison/Acceptation de livraison.

Objets applicables : Comprend tous les produits métalliques, tels que l'acier, les carbures cimentés (tels que le revêtement par projection thermique WC-Co), l'aluminium, etc., ainsi que leurs produits semi-finis et produits finis.

Objectif : Définit le type de document d'inspection pour garantir que le produit répond aux exigences de la commande et facilite la vérification de la qualité.

1.2 La présente norme s'applique à la certification de la qualité (Certification Qualité) des produits lors de leur livraison.

1.3 La présente norme ne couvre pas les méthodes d'inspection spécifiques (Méthodes d'inspection) mais spécifie uniquement le contenu et le format des documents.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent les clauses de cette norme par référence dans cette norme :

EN 10168:2004 - Produits sidérurgiques — Documents de contrôle — Liste des informations et description

EN ISO 9000:2000 - Systèmes de management de la qualité — Principes fondamentaux et vocabulaire / Systèmes de management de la qualité — Principes fondamentaux et vocabulaire

Remarque : S'il existe une version révisée, la dernière version s'appliquera.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants, en référence à la norme EN ISO 9000 :

Document d'inspection : Document écrit qui prouve que le produit répond aux exigences commandées.

Fabricant : L'entité responsable de la production de produits métalliques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Représentant d'inspection : Un inspecteur indépendant nommé par l'Acheteur ou un tiers.

Déclaration de conformité : Déclaration du fabricant déclarant que le produit est conforme aux exigences commandées.

Certificat d'inspection : Document contenant des résultats d'inspection spécifiques.

4. Types de documents d'inspection

4.1 Type 2.1 - Déclaration de conformité à la commande

Contenu

Le fabricant déclare que le produit est conforme aux exigences commandées.

Aucun résultat de test spécifique.

Exemple :

Description du produit : Poudre de revêtement WC-Co.

Numéro de commande (Numéro de commande).

Déclaration de conformité : Le produit est conforme aux spécifications de la commande (Conforme aux spécifications de la commande / Répond aux spécifications de la commande).

4.2 Type 2.2 - Rapport d'essai

Contenu

Le fabricant déclare que le produit est conforme aux exigences commandées.

Contient des résultats de tests non spécifiques (résultats de tests non spécifiques), tels que des données de tests par lots (tests par lots).

Exemple :

Description du produit : Poudre de revêtement WC-12Co.

Composition chimique/Composition chimique : Co 12±0,5%.

Taille des particules : 10-45 μ m .

4.3 Type 3.1 - Certificat d'inspection

Contenu

Délivré par le représentant d'inspection autorisé du fabricant (Représentant d'inspection autorisé).

Contient des résultats de tests spécifiques (Résultats de tests spécifiques / Résultats de tests spécifiques), tels que la composition chimique, les propriétés mécaniques (Propriétés mécaniques / Propriétés mécaniques).

Validation : L'inspection représente l'indépendance du service de fabrication.

Exemple :

Description du produit : Poudre de revêtement WC-Co.

Composition chimique : C 5,3%, Co 12,1%.

Microstructure : Porosité <1%.

Signataire : Représentant du Service Qualité.

4.4 Type 3.2 - Certificat d'inspection

Contenu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Délivré conjointement par le représentant d'inspection autorisé du fabricant et le représentant désigné de l'acheteur (représentant de l'acheteur/représentant désigné de l'acheteur) ou un tiers.

Contient des résultats de tests spécifiques.

Validation : Nécessite la participation de l'acheteur ou d'un tiers.

Exemple :

Description du produit : Poudre de revêtement WC-Co.

Dureté : HV 1200±50.

Délivré par : le représentant qualité du fabricant et le représentant de l'acheteur (représentant de l'acheteur).

5. Exigences relatives au contenu des documents

Informations de base

Nom et adresse du fabricant .

Numéro de commande (Numéro de commande) et description du produit (Description du produit).

Date de livraison (Delivery Date) et Quantité (Quantity).

Informations d'inspection (applicables aux types 2.2, 3.1 et 3.2) :

Norme d'inspection : telle que ISO 14923.

Résultats des tests (Test Results) : tels que la composition chimique, les propriétés physiques (Physical Properties).

Informations d'émission :

Nom et fonction du signataire / Nom et fonction du signataire.

Date d'émission (Date d'émission / Date d'émission).

6. Validation et transfert des documents

Validation

Tous les documents doivent être signés par une personne autorisée (Signature autorisée).

Les documents électroniques doivent être conformes au Règlement sur la signature électronique.

Transfert :

La documentation est livrée avec le produit (Livré avec le Produit).

Ou fournies par voie électronique, la traçabilité doit être assurée.

7. Rapport

Contenu

Type de document : tel que le type 3.1.

Description du produit : Tel que la poudre de revêtement WC-Co.

Résultats des tests : tels que la dureté et la porosité.

Déclaration de conformité (Déclaration de conformité).

Exemple :

Certificat de type 3.1, poudre de revêtement WC-12Co, dureté HV 1210, porosité 0,8%, conforme aux exigences de la commande.

8. Applicabilité et limites

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Applicabilité : Applicable à la certification qualité des produits métalliques à la livraison. Largement utilisé pour la vérification de la qualité de matériaux tels que le carbure cémenté et l'acier.

Limites :

Elle n'implique pas de méthodes d'essai spécifiques et nécessite une référence à d'autres normes (telles que la norme ISO 14923).

Le type de document doit être sélectionné en fonction des exigences du contrat.

Résumé

La norme EN 10204:2004 « Produits métalliques — Types de documents de contrôle / Produits métalliques — Types de documents de contrôle » fournit les types et les exigences des documents de contrôle pour les produits métalliques (tels que les revêtements WC-Co projetés thermiquement) au moment de la livraison, y compris les types 2.1, 2.2, 3.1 et 3.2, qui conviennent à la vérification de la qualité et à l'acceptation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ISO 6508-1:2016

Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 1 : Méthode d'essai
Matériaux métalliques - Essai de dureté Rockwell
— Partie 1 : Méthodes d'essai

1. Portée

1.1 La présente norme spécifie la méthode d'essai de dureté Rockwell pour les matériaux métalliques, y compris l'équipement d'essai, la procédure d'essai et le calcul de la valeur de dureté.

Objets applicables : acier, fonte, métaux non ferreux et substrat de revêtement par projection thermique (tel que substrat de revêtement WC-Co).

Objectif : Mesurer la dureté des matériaux pour le contrôle qualité, la sélection des matériaux et l'évaluation des performances.

1.2 Cette norme couvre la dureté Rockwell régulière (dureté Rockwell régulière / dureté Rockwell régulière, HRA, HRB, HRC, etc.) et la dureté Rockwell superficielle (dureté Rockwell superficielle / dureté Rockwell superficielle, HR15N, HR30T, etc.).

1.3 La présente norme ne s'applique pas aux matériaux non métalliques (Matériaux non métalliques / Matériaux non métalliques) ou aux matériaux dont l'épaisseur est inférieure à l'épaisseur minimale requise par l'essai (Épaisseur minimale / Épaisseur minimale).

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent les clauses de cette norme par référence dans cette norme :

ISO 6508-2:2015 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 2 : Vérification et étalonnage des machines d'essai

ISO 6508-3:2015 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 3 : Étalonnage des blocs de référence

ISO 376:2011 - Matériaux métalliques — Étalonnage des instruments de mesure de force utilisés pour la vérification des machines d'essais uniaxiaux

Remarque : S'il existe une version révisée, la dernière version s'appliquera.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Dureté Rockwell : La valeur de dureté de la profondeur d'indentation résiduelle est mesurée après l'application de la force d'essai préliminaire (Force d'essai préliminaire) et de la force d'essai totale (Force d'essai totale) au matériau par le pénétrateur (Indenter). L'unité est l'indice de dureté Rockwell (HR).

Pénétrateur : Cône diamant (120°) ou Bille d'acier (1/16 pouce , 1/8 pouce , 1/4 pouce).

Force d'essai préliminaire : La force initialement appliquée, par exemple 10 kgf (normale) ou 3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

kgf (faible).

Force d'essai totale : comprend la force d'essai préliminaire et la force d'essai supplémentaire, telle que 60 kgf , 100 kgf , 150 kgf (conventionnelle) ou 15 kgf , 30 kgf , 45 kgf (faible).

Profondeur d'indentation : Profondeur d'indentation restante après suppression de la force d'essai totale, en μm .

4. Équipement de test

Machine d'essai de dureté / Testeur de dureté :

Conforme aux exigences de la norme ISO 6508-2, fonctionnement automatique ou manuel (Fonctionnement automatique ou manuel / Fonctionnement automatique ou manuel).

Précision d'application de la force (précision d'application de la force) $\pm 0,5\%$.

Pénétrateur :

Cône diamant : rayon de pointe 0,2 mm, dureté $\geq 9000\text{ HV}$.

Billes d'acier : diamètre 1/16 pouce (1,588 mm), 1/8 pouce (3,175 mm), 1/4 pouce (6,35 mm), dureté $\geq 850\text{ HV}$.

Blocs de référence :

Pour l'étalonnage, la plage de dureté couvre HRA 20-88, HRB 20-100, HRC 20-70, etc., conformément à la norme ISO 6508-3.

Conditions environnementales

Température : $23\pm 5^\circ\text{C}$.

Humidité : 30-80%.

5. Procédure de test

Préparation des échantillons :

Planéité de surface (Flat Surface / Planéité de surface), rugosité (Roughness / Rugosité) $Ra \leq 0,8\ \mu\text{m}$.

Élimine l'huile (Huile / Huile) et la couche d'oxyde (Couche d'oxyde / Couche d'oxyde).

Épaisseur minimale : 0,5 mm (couche superficielle), 1,0 mm (conventionnelle), voir le tableau 1 pour plus de détails.

Sélection de la force de test (Sélection de la force de test) :

Rockwell conventionnel : force d'essai préliminaire 10 kgf , force d'essai totale 60 kgf (HRB), 100 kgf (HRC), 150 kgf (HRA).

peu profond : force d'essai préliminaire 3 kgf , force d'essai totale 15 kgf (HR15N), 30 kgf (HR30T), 45 kgf (HR45W).

Étapes du test :

Appliquez la force de test préliminaire (Appliquer la force de test préliminaire / Appliquer la force de test préliminaire) et maintenez pendant 1 à 5 secondes.

Appliquez une force de test supplémentaire (Appliquer une force de test supplémentaire) et maintenez pendant 5 à 10 secondes.

Supprimez la force de test totale et mesurez la profondeur d'indentation résiduelle.

Mesure :

La valeur de dureté est lue automatiquement par le testeur de dureté en HR.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'espacement minimum pour chaque mesure doit être ≥ 3 mm et la distance jusqu'au bord doit être $\geq 2,5$ mm.

6. Calcul de la valeur de dureté

Formule (Formule / formule) :

$$HR = 100 - h \times k$$

h : profondeur d'indentation résiduelle (unité : 0,002 mm).

k : constante proportionnelle (dépendant de la hauteur de pression et de la force d'essai, par exemple k=500 en HRC).

Tableau 1 : Échelles de dureté Rockwell (Échelles de dureté Rockwell) :

ISO 6508-2:2015

Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell
— Partie 2 : Vérification et étalonnage des machines d'essai
Matériaux métalliques - Essai de dureté Rockwell
— Partie 2 : Vérification et étalonnage des machines d'essai

1. Portée

1.1 La présente norme spécifie les méthodes de vérification et d'étalonnage des machines d'essai utilisées pour l'essai de dureté Rockwell sur les matériaux métalliques.

Objets applicables : comprend les machines d'essai de dureté Rockwell ordinaires et les machines d'essai de dureté Rockwell superficielles, adaptées aux substrats de revêtement en acier, en fonte et par projection thermique (tels que les substrats de revêtement WC-Co).

Objectif : garantir que la machine d'essai est conforme aux exigences de la norme ISO 6508-1 et fournit une mesure de dureté fiable pour le contrôle qualité et la conformité aux normes.

1.2 Cette norme couvre la vérification initiale, la vérification périodique et la vérification après étalonnage.

1.3 La présente norme ne couvre pas la conception ou la fabrication des machines d'essai.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent les clauses de cette norme par référence dans cette norme :

ISO 6508-1:2016 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 6508-3:2015 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 3 : Étalonnage des blocs de référence

ISO 376:2011 - Matériaux métalliques — Étalonnage des instruments de mesure de force utilisés pour la vérification des machines d'essais uniaxiaux

Remarque : S'il existe une version révisée, la dernière version s'appliquera.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants, en référence à l'ISO 6508-1 :

Vérification : Confirmation que les performances de la machine d'essai répondent aux exigences spécifiées, y compris les contrôles d'erreur et de répétabilité.

Étalonnage : Réglage de la machine d'essai à l'aide de blocs de référence pour éliminer les écarts systématiques.

Force d'essai (Test Force / Test force) : comprend la force d'essai préliminaire (Preliminary Test Force / Preliminary Test Force) et la force d'essai totale (Total Test Force / Total Test Force) .

Pénétrateur : Cône en diamant (Diamond Cone) ou bille en acier (Steel Bille) utilisé pour appliquer la force d'essai.

Bloc de référence : Un bloc standard avec une valeur de dureté connue utilisé pour l'étalonnage et la vérification.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Exigences en matière de vérification et d'étalonnage

Vérification initiale

Cela se fait après l'achat d'une nouvelle machine de test ou après une réparation majeure.

Couvre toutes les échelles (Échelles / Échelles) et forces d'essai (Forces d'essai / Forces d'essai).

Vérification périodique (Vérification périodique) :

Effectuer tous les 12 mois ou ajuster en fonction de la fréquence d'utilisation (par exemple, tous les 6 mois pour une utilisation à haute fréquence).

Vérifiez si l'erreur (Erreur / Erreur) se situe dans la plage de tolérance (Dans la plage de tolérance / Plage autorisée).

Vérification après étalonnage (Vérification après étalonnage) :

Effectué immédiatement après l'étalonnage pour confirmer l'efficacité du réglage (efficacité du réglage).

Erreur tolérée :

conventionnel : $\pm 0,5$ HR (HRA, HRB, HRC).

Rockwell superficiel : $\pm 0,8$ HR (HR15N, HR30T, etc.).

5. Équipement de test

Machine d'essai

Conforme aux exigences de la norme ISO 6508-1, précision d'application de la force (Force Application Accuracy) $\pm 0,5$ %.

Equipé d'un chargement automatique ou manuel du pénétrateur.

Pénétrateur :

Cône diamant : rayon de pointe 0,2 mm, dureté ≥ 9000 HV.

Billes d'acier : diamètre 1/16 pouce (1,588 mm), 1/8 pouce (3,175 mm), 1/4 pouce (6,35 mm), dureté ≥ 850 HV.

Blocs de référence :

Conforme à la norme ISO 6508-3, la gamme de dureté couvre HRA 20-88, HRB 20-100, HRC 20-70, etc.

Utilisez au moins 3 blocs de référence par règle.

Outils de mesure :

Instrument de mesure de force, précision $\pm 0,1$ %, conformément à la norme ISO 376.

6. Procédure de vérification

Préparation

Pénétrateur propre (Clean Indenter) et surface du bloc de référence (Reference Block Surface).

Assurer les conditions environnementales : température $23 \pm 5^\circ\text{C}$, humidité 30-80%.

Étapes du test :

Sélectionnez l'échelle appropriée (Sélectionner l'échelle appropriée) et la force de test (Force de test) .

Effectuer 5 mesures (5 Mesures / 5 Mesures) sur chaque bloc de référence et enregistrer les valeurs de dureté (Valeurs de dureté / Valeurs de dureté).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Calculer la moyenne (Moyenne / Average) et l'écart type (Écart type / Standard Deviation).

Vérification des erreurs (Error Check) :

L'écart (Déviation / Déviation) de la valeur mesurée par rapport à la valeur nominale (Valeur nominale / Valeur nominale) du bloc de référence ne doit pas dépasser l'erreur tolérée (Erreur tolérée / Erreur tolérée).

Répétabilité : Différence maximale entre 5 mesures $\leq 0,3$ HR (conventionnelle) ou $\leq 0,5$ HR (superficielle).

7. Procédure d'étalonnage

Ajustement

Si le résultat de la vérification dépasse l'erreur tolérée (Dépasse l'erreur tolérée / Dépasse l'erreur tolérée), ajustez la force d'essai (Force d'essai / Force d'essai) ou le système de mesure de profondeur (Système de mesure de profondeur / Système de mesure de profondeur) de la machine d'essai.

Calibrer à l'aide d'un bloc de référence et ajuster jusqu'à ce que la valeur mesurée soit cohérente avec la valeur nominale (Conforme à la valeur nominale).

Vérification

Après l'étalonnage, répétez la vérification (Répéter la vérification) en utilisant différents blocs de référence pour confirmer l'efficacité du réglage (Efficacité du réglage).

Enregistrer :

Enregistrez les valeurs de réglage avant et après et la date d'étalonnage.

8. Rapport

Contenu

Le modèle (Modèle) et le numéro de série (Numéro de série) de la machine d'essai.

Date de vérification ou d'étalonnage (Date de vérification ou d'étalonnage).

Blocs de référence utilisés : Plage de dureté et valeur nominale.

Résultats de mesure : valeur moyenne, écart type et écart maximal.

Si l'erreur tolérée (Erreur tolérée) est respectée.

Opérateur (Opérateur) et État d'étalonnage de l'équipement (État d'étalonnage de l'équipement).

Exemple :

Machine d'essai modèle XYZ-100, numéro de série 12345, date d'étalonnage 31 mai 2025, bloc de référence HRC 50-60, moyenne HRC 59,8, écart $\pm 0,2$ HR, répond aux exigences.

9. Précision et biais

Précision : Au sein du laboratoire (Au sein du laboratoire / Répétabilité) $< 0,3$ HR, Entre les laboratoires (Entre les laboratoires / Reproductibilité) $< 0,5$ HR.

Biais : peut être causé par l'usure du pénétrateur, l'inhomogénéité du bloc de référence ou des changements environnementaux, et nécessite une maintenance régulière de l'équipement.

10. Applicabilité et limites

Applicabilité : Applicable à la vérification et à l'étalonnage des machines d'essai de dureté Rockwell pour garantir la précision des essais de dureté des matériaux métalliques, y compris l'application de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

substrats de revêtement par projection thermique.

Limites :

Ne convient pas aux machines d'essai de dureté non Rockwell.

Pour des exigences de précision élevées (telles que $\pm 0,1$ HR), un bloc ou un dispositif de référence de qualité supérieure doit être utilisé.

Résumé

La norme ISO 6508-2:2015 « Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 2 : Vérification et étalonnage des machines d'essai / Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 2 : Vérification et étalonnage des machines d'essai » fournit des méthodes de vérification et d'étalonnage des machines d'essai de dureté Rockwell afin de garantir qu'elles sont conformes aux exigences de la norme ISO 6508-1 et qu'elles sont applicables aux essais de dureté des matériaux métalliques (tels que les substrats revêtus de WC-Co).

La norme ISO 6508-3:2015 « Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 3 : Étalonnage des blocs de référence » est une version mixte en chinois et en anglais de la norme, qui en énumère les clauses et exigences complètes. Son contenu est basé sur la norme officielle publiée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et s'applique à l'étalonnage (Étalonnage) des blocs de référence pour l'essai de dureté Rockwell (Blocs de référence), garantissant l'exactitude et la traçabilité de leur valeur de dureté (Traçabilité). Elle est également utilisée pour la vérification des essais de dureté des matériaux métalliques (tels que les substrats de revêtement par projection thermique ou les matériaux apparentés au carbure cimenté).

ISO 6508-3:2015

Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 3 : Étalonnage des blocs de référence Matériaux métalliques - Essai de dureté Rockwell — Partie 3 : Étalonnage des blocs de référence

1. Portée

1.1 La présente norme spécifie la méthode d'étalonnage des blocs de référence utilisés dans l'essai de dureté Rockwell. Elle s'applique aux essais de dureté des matériaux métalliques.

Objets applicables : comprend les blocs de référence de dureté Rockwell standard (tels que HRA, HRB, HRC) et les blocs de référence de dureté Rockwell superficielle (tels que HR15N, HR30T), applicables à l'acier (acier), à la fonte (fonte) et au substrat de revêtement par projection thermique (tel que le substrat de revêtement WC-Co).

Objectif : Assurer des valeurs de dureté précises des blocs de référence avec traçabilité pour la vérification et l'étalonnage des machines d'essai de dureté Rockwell.

1.2 La présente norme s'applique aux laboratoires d'étalonnage et aux fabricants.

1.3 Cette norme ne couvre pas le processus de fabrication (Processus de fabrication / Processus de fabrication) ni la sélection des matériaux (Sélection des matériaux / Sélection des matériaux) pour les blocs de référence.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent les clauses de cette norme par référence dans cette norme :

ISO 6508-1:2016 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 6508-2:2015 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 2 : Vérification et étalonnage des machines d'essai

ISO/CEI 17025:2005 - Exigences générales relatives à la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais

Note : S'il existe une version révisée, la dernière version s'applique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants, en référence à l'ISO 6508-1 :

Bloc de référence : Un bloc standard avec une valeur de dureté connue utilisé pour étalonner et vérifier les machines d'essai de dureté Rockwell.

Étalonnage : Déterminer la valeur de dureté d'un bloc de référence à l'aide d'une Machine d'Essai Standard et assurer sa traçabilité.

Traçabilité : Les valeurs de dureté des blocs de référence sont liées à des Normes Internationales ou Nationales par une chaîne d'étalonnage.

Uniformité : Écart de la valeur de dureté de la surface du bloc de référence, en HR.

4. Exigences relatives aux blocs de référence

Matériel

Généralement en acier (Acier / Acier) ou en carbure (Carbure / Carbure) avec une dureté uniforme (Dureté uniforme / Dureté uniforme).

Surface sans défaut / Surface sans défaut, telle que fissures (Cracks) ou inclusions (Inclusions).

Dimensions :

Épaisseur : ≥ 6 mm (Rockwell conventionnel) ou ≥ 2 mm (Rockwell superficiel).

Surface ≥ 25 mm \times 25 mm, au moins 5 mesures sont autorisées.

Qualité de surface

Rugosité (Rugosité) $Ra \leq 0,4$ μ m .

Planéité (Planéité) $\leq 0,005$ mm.

Plage de dureté :

Rockwell conventionnel : HRA 20-88, HRB 20-100, HRC 20-70.

Rockwell peu profond : HR15N 70-94, HR30T 40-80.

5. Procédure d'étalonnage

Équipement d'étalonnage

Utilisez une machine d'essai de dureté Rockwell standard (machine d'essai de dureté Rockwell standard) conformément à la norme ISO 6508-2.

Pénétrateur : Cône diamant (rayon de pointe 0,2 mm, dureté ≥ 9000 HV) ou bille d'acier (1/16, 1/8, 1/4 pouce , dureté ≥ 850 HV).

Conditions environnementales

Température : 23 ± 2 °C.

Humidité : 30-80%.

Étapes d'étalonnage :

Nettoyer la surface du bloc de référence (Nettoyer la surface du bloc de référence).

Sélectionnez l'échelle appropriée (Sélectionner l'échelle appropriée) et la force de test (Force de test) .

Effectuer des mesures sur au moins 5 points de mesure répartis uniformément sur le bloc de référence.

Calculez la valeur de dureté moyenne (valeur de dureté moyenne) et l'uniformité (uniformité).

Exigence d'uniformité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La différence maximale entre les points de mesure (Différence maximale / Différence maximale) est $\leq 0,5$ HR (Rockwell conventionnel) ou $\leq 0,8$ HR (Rockwell superficiel).

6. Résultats d'étalonnage

Valeur de dureté :

La valeur de dureté d'étalonnage du bloc de référence est la valeur moyenne (Average Value / Average Value), l'unité est HR.

Exemple : HRC $60,2 \pm 0,3$.

Incertitude

Incertitude d'étalonnage $\leq \pm 0,5$ HR (Rockwell conventionnel) ou $\pm 0,8$ HR (Rockwell peu profond). Conforme aux exigences de la norme ISO/IEC 17025 et fournit une déclaration d'incertitude.

Traçabilité

Les résultats d'étalonnage doivent être traçables aux normes nationales ou internationales, par exemple via un bloc de référence primaire.

7. Certificat d'étalonnage

Contenu

Identification du bloc de référence (Reference Block Identification) : tel que le numéro de série (Serial Number).

Échelle (Échelle / Échelle) et valeur de dureté (Valeur de dureté / Valeur de dureté) : telles que HRC $60,2 \pm 0,3$.

Uniformité : La différence maximale entre les points de mesure.

Incertitude : Par exemple, $\pm 0,4$ HR.

Date d'étalonnage (Calibration Date / Calibration Date) et période de validité (Validity Period / Validity Period) : Généralement 2 ans.

sur le laboratoire d'étalonnage : Nom, adresse et statut d'accréditation ISO/IEC 17025.

Exemple :

Numéro de série du bloc de référence 12345, échelle HRC, valeur de dureté $60,1 \pm 0,3$, uniformité $0,4$ HR, incertitude $\pm 0,4$ HR, date d'étalonnage 31 mai 2025, valable jusqu'au 31 mai 2027.

8. Précision et biais

Précision : Au sein du laboratoire (Au sein du laboratoire / Répétabilité) $< 0,3$ HR, Entre les laboratoires (Entre les laboratoires / Reproductibilité) $< 0,5$ HR.

Biais : peut être causé par une inhomogénéité de surface du bloc de référence, une erreur de la machine de test ou des conditions environnementales, et nécessite un contrôle strict du processus d'étalonnage.

9. Applicabilité et limites

Applicabilité : Convient pour l'étalonnage des blocs de référence de dureté Rockwell, garantissant la précision et la traçabilité des tests de dureté, et largement utilisé pour la vérification de la dureté des substrats de revêtement par projection thermique.

Limites :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ne convient pas aux blocs de référence de dureté non Rockwell.

Une utilisation excessive du bloc de référence (Nombre d'utilisations / Nombre d'utilisations) peut provoquer une usure de la surface (Usure de surface / Usure de surface) et nécessiter un recalibrage régulier (Recalibration / Recalibration).

Résumé

La norme ISO 6508-3:2015 « Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 3 : Étalonnage des blocs de référence » fournit une méthode d'étalonnage des blocs de référence de dureté Rockwell afin de garantir la précision et la traçabilité de leurs valeurs. Elle convient à la vérification des essais de dureté des matériaux métalliques (tels que les substrats revêtus de WC-Co).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

ISO 18265:2013 - Matériaux métalliques

— Conversion des valeurs de dureté

Matériaux métalliques

— Conversion des valeurs de dureté

1. Portée

1.1 La présente norme spécifie les méthodes de conversion (méthodes de conversion) des valeurs de dureté (valeurs de dureté) des matériaux métalliques (matériaux métalliques) entre différentes échelles de dureté (échelles de dureté).

Objets applicables : acier, fonte, métaux non ferreux et substrat de revêtement par projection thermique (tel que substrat de revêtement WC-Co).

Objectif : Fournir des tables de conversion (Tables de conversion / Formules de conversion) entre les échelles de dureté à utiliser dans la comparaison des matériaux (Comparaison des matériaux / Comparaison des matériaux) et le contrôle qualité (Contrôle qualité / Contrôle qualité).

1.2 Cette norme couvre les échelles de dureté suivantes :

Dureté Rockwell (dureté Rockwell) : HRA, HRB, HRC, HR15N, etc.

Dureté Brinell (Brinell Hardness) : HBW (par exemple HBW 10/3000).

Dureté Vickers (Dureté Vickers) : HV (par exemple HV 10).

Dureté Knoop (Knoop Dureté) : HK.

1.3 La présente norme ne s'applique pas aux matériaux non métalliques ni aux matériaux spéciaux traités thermiquement, sauf indication contraire.

2. Références normatives

Cette norme fait référence aux documents suivants, et leurs clauses deviennent les clauses de cette norme par référence dans cette norme :

ISO 6506-1:2014 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Brinell — Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 6507-1:2018 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Vickers — Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 6508-1:2016 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 1 : Méthode d'essai

ISO 4545-1:2017 - Matériaux métalliques — Essai de dureté Knoop — Partie 1 : Méthode d'essai

Remarque : S'il existe une version révisée, la dernière version s'appliquera.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Conversion de la valeur de dureté : Le processus de conversion de la valeur mesurée (valeur mesurée) d'une échelle de dureté à la valeur d'une autre échelle de dureté.

Échelle de dureté : Méthode d'expression des valeurs de dureté correspondant à une méthode d'essai de dureté spécifique, telle que HRC, HBW et HV.

Tableau de conversion : Tableau de valeurs de dureté basé sur des données expérimentales ou des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

modèles théoriques.

Incertitude : L'erreur (Erreur) qui peut être introduite lors du processus de conversion de la valeur de dureté, exprimée en unités de valeur de dureté (telles que HR, HV).

4. Principes de conversion

Classification des matériaux

La conversion de dureté doit prendre en compte le type de matériau (Type de matériau / Type de matériau), tel que l'acier à faible teneur en carbone (Acier à faible teneur en carbone / Acier à faible teneur en carbone), l'acier allié (Acier allié / Acier allié), l'alliage d'aluminium (Alliage d'aluminium / Alliage d'aluminium).

Différents matériaux ont des relations de conversion différentes.

Conditions de test :

La valeur de dureté doit être mesurée dans les mêmes conditions (Mêmes conditions), telles que la température (Température) $23 \pm 5^\circ\text{C}$ et la rugosité de surface (Rugosité de surface) $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$.

La force d'essai (Test Force / Test force) et le pénétrateur (Indenter / Indenter) doivent être conformes aux normes d'essai de dureté pertinentes (telles que ISO 6508-1).

Incertitude

L'incertitude de la valeur convertie est généralement de $\pm 5\%$ (selon l'échelle et le matériau).

Les valeurs converties sont fournies à titre indicatif uniquement (Pour référence uniquement) et ne remplacent pas la mesure directe (Mesure directe).

5. Tables de conversion

1 : Conversion de dureté pour l'acier

Exemple:

HRC	HBW (10/3000)	HT (10)
20	238	240
40	392	420
60	654	720

Tableau 2 : Conversion de dureté pour la fonte (Conversion de dureté pour la fonte / Conversion de dureté pour la fonte) :

Exemple:

HRB	HBW (10/3000)
50	149
80	228

Tableau 3 : Conversion de dureté pour les métaux non ferreux (Conversion de dureté pour les métaux non ferreux / Conversion de dureté pour les métaux non ferreux) :

Exemple:

HRB	HT (5)
40	75

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HRB	HT (S)
70	130

Remarque (Note / Note) :

Le tableau de conversion complet est donné en annexe de la norme.

Les tables de conversion sont basées sur des données expérimentales approfondies et conviennent à un usage général.

6. Formules de conversion

Exemple de formule :

Conversion de HRC en HV (acier à faible teneur en carbone) :

$$HV = 100 \times (HRC + 10) / 3$$

Conversion de HBW en HRC (acier allié) :

$$HRC = 0,087 \times HBW - 5,5$$

Champ d' application :

La formule est applicable à une plage de dureté spécifique (plage de dureté spécifique), telle que HRC 20-60.

Vous devez sélectionner la formule correspondante en fonction du type de matériau.

Incertitude

L'incertitude de la formule de conversion est généralement de $\pm 8\%$, selon le matériau et la plage de dureté.

7. Précautions d'utilisation des tables de conversion

Cohérence du matériau

Assurez-vous que le type de matériau avant et après la conversion est cohérent (Type de matériau cohérent / Le type de matériau est cohérent), par exemple en évitant de convertir le HRC de l'acier à faible teneur en carbone en HV de l'acier fortement allié.

Conditions de test :

La valeur de dureté doit être mesurée dans des conditions standard (Mesure dans des conditions standard / Mesurée dans des conditions standard), si la force d'essai, le pénétrateur et la qualité de surface (Qualité de surface / Qualité de surface) répondent aux exigences.

Limitations de conversion :

Les valeurs converties peuvent présenter des écarts dus à des différences de microstructure.

Pour une dureté élevée (HRC>60) ou une dureté faible (HRB<20), l'erreur de conversion est plus grande (erreur plus grande).

8. Rapport

Contenu

Valeur de dureté d'origine : Par exemple, HRC 55,0.

Valeur de dureté convertie : Par exemple, HV 580.

Type de matériau : tel que l'acier allié.

Tableau de conversion ou formule utilisée : voir le tableau 1.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Incertitude (Incertitude) : par exemple $\pm 5\%$.

Date d'inspection (Date d'inspection) et opérateur (Opérateur).

Exemple :

Acier allié, valeur d'origine HRC 55,0, convertie en HV 580, en utilisant le tableau 1, incertitude $\pm 5\%$, date xx / xx / 2025.

9. Précision et biais

Précision : La répétabilité de la valeur convertie dépend de la précision de la mesure d'origine, qui est généralement $< \pm 3\%$.

Biais :

Cela peut être dû à des différences dans la microstructure du matériau (Microstructure du matériau / Microstructure du matériau), les conditions de traitement thermique (Conditions de traitement thermique / Condition de traitement thermique) ou les conditions de test (Conditions de test / Conditions de test).

La plage d'écart est généralement de $\pm 5\%$ à $\pm 10\%$.

10. Applicabilité et limites

Applicabilité : Convient pour la conversion de la valeur de dureté de l'acier, de la fonte et des métaux non ferreux, et largement utilisé pour la comparaison de la dureté des substrats de revêtement par projection thermique.

Limites :

Ne convient pas aux matériaux non métalliques.

Les matériaux spéciaux traités thermiquement (tels que trempés et revenus) doivent être utilisés avec prudence (Utiliser avec prudence).

Les valeurs converties sont données à titre indicatif uniquement, la mesure directe est préférée.

Résumé

La norme ISO 18265:2013 « Matériaux métalliques — Conversion des valeurs de dureté » fournit une méthode de conversion des valeurs de dureté des matériaux métalliques entre différentes échelles (telles que Rockwell, Brinell, Vickers), incluant des tables et des formules de conversion. Elle convient au contrôle qualité et à la comparaison des matériaux, mais ses limites doivent être soulignées.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice:

dureté Knoop tableau des ratios

Tableau comparatif des duretés Rockwell, Brinell, Vickers et Knoop
Tableau comparatif des duretés Rockwell, Brinell, Vickers et Knoop

Aspect	Dureté Rockwell	Dureté Brinell	Dureté Vickers	Dureté Knoop
Définition	Les forces d'essai initiales et totales sont appliquées par le pénétrateur, et la profondeur d'indentation résiduelle est mesurée pour calculer la valeur de dureté en HR (comme HRC).	La force d'essai est appliquée par un pénétrateur à bille d'acier, le diamètre d'indentation est mesuré et la valeur de dureté est calculée en HBW (par exemple HBW 10/3000).	La force d'essai est appliquée par un pénétrateur pyramidal quadrangulaire en diamant, et la longueur diagonale de l'empreinte est mesurée pour calculer la valeur de dureté (en HV).	La force d'essai est appliquée par un pénétrateur pyramidal long en diamant, et la longueur diagonale de l'indentation est mesurée pour calculer la valeur de dureté en HK (par exemple HK 0,5).
Standard	ISO 6508-1:2016	ISO 6506-1:2014	ISO 6507-1:2018	ISO 4545-1:2017
Pénétrant	Cône diamanté (120°, rayon de pointe 0,2 mm) ou bille d'acier (1/16, 1/8, 1/4 pouce).	Bille en carbure de tungstène, généralement avec des diamètres de 10 mm, 5 mm et 2,5 mm.	Pyramide de diamant, avec un angle au sommet de 136°.	Pyramide rhombique en diamant, avec un angle au sommet vertical de 172,5° et un angle au sommet horizontal de 130°.
Force d'essai	Conventionnel : force initiale 10 kgf, force totale 60, 100, 150 kgf ; Couche superficielle : force initiale 3 kgf, force totale 15, 30, 45 kgf.	Couramment utilisé : 500, 1000, 3000 kgf (par exemple HBW 10/3000 signifie boule de 10 mm, 3000 kgf).	Couramment utilisé : 1 à 100 kgf (par exemple, HV 10 signifie 10 kgf), peut être aussi bas que 0,01 kgf.	Couramment utilisé : 0,01-2 kgf (par exemple, HK 0,5 signifie 0,5 kgf).
Méthode de mesure	Mesurez la profondeur d'indentation résiduelle (profondeur d'indentation) en unités de 0,002 mm et lisez directement la valeur HR.	Mesurez le diamètre d'indentation en mm et calculez-le à l'aide de la formule : $HBW = 2F / (\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2}))$.	Mesurez la longueur diagonale de l'indentation en mm et calculez-la à l'aide de la formule : $HV = 1,8544F / d^2$.	Mesurez la longueur diagonale longue de l'indentation en mm et calculez-la à l'aide de la formule : $HK = 14,229F / L^2$.
Plage de dureté	HRA 20-88, HRB 20-100, HRC 20-70, HR15N 70-94, etc.	HBW 8-650 (selon la force d'essai et le diamètre de la bille).	HV 1-3000 (selon la force d'essai).	HK 10-1000 (selon la force d'essai).
Matériaux applicables	Matériaux métalliques (tels que l'acier, la fonte, les substrats de revêtement par	Matériaux métalliques (tels que l'acier, la fonte, l'alliage d'aluminium), adaptés aux	Métaux, céramiques, revêtements (par exemple, revêtements par projection	Métaux, céramiques, couches minces, matériaux cassants (comme le verre),

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

	projection thermique), particulièrement adaptés aux matériaux de dureté élevée (HRC) et aux matériaux de dureté moyenne (HRB).	matériaux plus tendres et aux spécimens plus gros.	thermique), adaptés à une large gamme de matériaux de dureté, y compris les couches minces.	particulièrement adaptés aux micro-zones.
Exigences relatives aux spécimens	La surface est plane, $Ra \leq 0,8 \mu m$, épaisseur $\geq 0,5 mm$ (couche peu profonde) ou $\geq 1,0 mm$ (classique).	La surface est plane, $Ra \leq 1,6 \mu m$, et l'épaisseur est ≥ 8 fois la profondeur d'indentation (généralement $\geq 6 mm$).	La surface est plane, $Ra \leq 0,4 \mu m$, et l'épaisseur est $\geq 1,5$ fois la longueur diagonale de l'indentation (généralement $\geq 0,2 mm$).	La surface est plane, $Ra \leq 0,2 \mu m$, épaisseur $\geq 0,1 mm$, adaptée aux petits échantillons.
Heure du test	Rapide, 5 à 10 secondes	Plus lent, 10 à 15 secondes, nécessite un temps de mesure supplémentaire.	Moyen, 10 à 15 secondes, mesure diagonale requise	Moyen, 10 à 15 secondes, longue ligne diagonale requise
Forme d'indentation	Rond (bille d'acier) ou conique (cône en diamant).	Circulaire.	Forme carrée.	Losange, avec un rapport longueur/largeur d'environ 7:1.
Avantages	Fonctionnement simple. Lecture directe de la dureté. Convient aux sites de production.	Convient à une large gamme de dureté (large gamme de dureté, grande indentation, haute représentativité).	Large gamme d'applications. Permet de tester des couches minces. Géométrie d'indentation homogène.	Convient aux micro-zones. Convient aux matériaux fragiles. Faible empreinte, moins de dommages.
Inconvénients	- Exigence de qualité de surface élevée / Exigence de qualité de surface élevée. - Différentes échelles ne peuvent pas être directement comparées (Échelles non directement comparables / Les échelles ne peuvent pas être directement comparées).	Grande empreinte, endommage l'échantillon. Ne convient pas aux matériaux fins ou durs.	- Nécessite une mesure optique / Nécessite une mesure optique. - Sensible à la rugosité de surface / Sensible à la rugosité de surface.	- Nécessite une mesure optique / Nécessite une mesure optique. - Indentation asymétrique, mesure complexe / Indentation asymétrique, mesure complexe.
Applications	Revêtement par projection thermique de substrats (tels que les substrats WC-Co), acier, essais de dureté de pièces mécaniques (Pièces mécaniques / Pièces mécaniques).	Pièces moulées, forgées, essais de dureté des métaux plus tendres.	Revêtements par projection thermique, films minces, couches durcies en surface.	Essais de microdureté de micropièces, revêtements, céramiques et verre.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Incertitude	±0,5 HR (conventionnel) ou ±0,8 HR (superficiel).	±5% (selon le matériau et la plage de dureté).	±3% (selon la force d'essai et le matériau).	±5% (selon la force d'essai et le matériau).
Relations de conversion	- HRC 20 ≈ HBW 238 ≈ HV 240 ≈ HK 255 - HRC 40 ≈ HBW 392 ≈ HV 420 ≈ HK 445 - HRC 60 ≈ HBW 654 ≈ HV 720 ≈ HK 760	- HBW 238 ≈ HRC 20 ≈ HV 240 ≈ HK 255 - HBW 392 ≈ HRC 40 ≈ HV 420 ≈ HK 445 - HBW 654 ≈ HRC 60 ≈ HV 720 ≈ HK 760	- HV 240 ≈ HRC 20 ≈ HBW 238 ≈ HK 255 - HV 420 ≈ HRC 40 ≈ HBW 392 ≈ HK 445- HV 720 ≈ HRC 60 ≈ HBW 654 ≈ HK 760	- HK 255 ≈ HRC 20 ≈ HBW 238 ≈ HV 240 - HK 445 ≈ HRC 40 ≈ HBW 392 ≈ HV 420 - HK 760 ≈ HRC 60 ≈ HBW 654 ≈ HV 720

Notes de conversion

Matériau applicable : La relation de conversion ci-dessus s'applique à l'acier (acier), sur la base du tableau de conversion et des données expérimentales de la norme ISO 18265:2013.

Incertitude : L'incertitude de la valeur convertie est d'environ ± 5 %. La microstructure du matériau (Microstructure / microstructure) et les conditions d'essai (Conditions d'essai / conditions d'essai) doivent être prises en compte en conditions réelles.

Recommandation d'utilisation : La valeur convertie est fournie à titre indicatif uniquement (Pour référence uniquement / Pour référence uniquement), une mesure directe (Mesure directe / Mesure directe) est recommandée.

Exemple :

HRC 40 ≈ HBW 392 ≈ HV 420 ≈ HK 445, ce qui signifie que pour les matériaux en acier, la dureté Rockwell HRC 40 peut être convertie en dureté Brinell HBW 392, dureté Vickers HV 420 et dureté Knoop HK 445.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Table des matières

Partie 2 : Procédé de préparation du carbure cimenté

Chapitre 6 : Technologie des revêtements et des composites

6.1 Préparation du revêtement en carbure cimenté

6.1.1 Pulvérisation de combustible à l'oxygène à grande vitesse (HVOF, dureté du revêtement HV 1200-1500)

6.1.2 Projection plasma (APS) et projection par détonation

6.2 Matériaux de revêtement

6.2.1 Optimisation de la composition des revêtements WCCo et WCNiCr

6.2.2 Revêtement composite multiphasé (WCTiCNi)

6.3 Carbures cimentés à gradient et nanostructurés

6.3.1 Ingénierie d'interface du WCCo à gradient

6.3.2 Préparation et défis du Nano-WC (<100 nm)

6.4 Test de performance du revêtement

6.4.1 Force de liaison (50-80 MPa) et porosité (<1%)

6.4.2 Résistance à l'usure (ASTM G65, taux d'usure < 0,06 mm³ / N · m)

appendice:

Qu'est-ce qu'un revêtement en carbure cimenté

Technologie de pulvérisation à haute explosion au carbure cimenté (DGS)

de projection plasma au carbure cimenté (APS , projection plasma atmosphérique)

Pulvérisation d'oxygène combustible à haute vitesse (HVOF) pour carbure cimenté

Projection plasma sous vide au carbure cimenté (VPS , projection plasma sous vide)

Ingénierie des interfaces en carbure

Technologie de modification de surface en carbure cimenté

Application du revêtement nanocomposite en carbure cimenté dans les cellules électrolytiques

Qu'est-ce que le carbure cimenté nano-revêtu

Qu'est-ce que le carbure à gradient ?

Pic minier en carbure à gradient et technologie

Application du carbure cimenté dans les buses d'aviation

ISO 14923:2003 Projection thermique - Caractérisation et essais des revêtements par projection thermique

Corde pour projection à la flamme et à l'arc - Classification - Conditions techniques de fourniture

ASTM C633-13 (2017) Méthode d'essai standard pour l'adhérence ou la force de cohésion des revêtements projetés thermiquement

ASTM E2109-01(2014) Méthode d'essai standard pour le pourcentage de porosité apparente des revêtements projetés thermiquement

EN 657:2005 Projection thermique - Terminologie et classification

EN 13507:2018 Projection thermique - Préparation de surface des pièces et assemblages métalliques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 18719-2002 Poudre pour projection thermique
GB/T 17391-2008 Méthode d'essai d'adhérence des revêtements par projection thermique
AMS 2437 : Spécification du procédé HVOF
ISO 3252:2019 Métallurgie des poudres — Vocabulaire
ISO 14923:2003 Projection thermique — Caractérisation et essai des revêtements projetés
thermiquement
ISO 4505:2017 Matériaux métalliques — Essai de dureté — Méthode d'essai
Matériaux métalliques -- Essais de dureté -- Méthodes d'essai
ASTM E2283-08 (2019) Pratique standard pour l'analyse des valeurs extrêmes des inclusions non
métalliques dans l'acier et d'autres caractéristiques microstructurelles
Pratique standard pour l'analyse des valeurs extrêmes des inclusions non métalliques dans l'acier et
d'autres caractéristiques microstructurelles
EN 13204:2017 Projection thermique — Poudres — Composition, conditions techniques de
fourniture
Projection thermique - Poudres - Composition, conditions techniques de fourniture
GB/T 5242-2007 « Projection thermique — Fils et tiges
Projection thermique - Fil et tige
GB/T3489-2012 Projection thermique — Examen métallographique des revêtements projetés
thermiquement
GB/T 38511-2020 Projection thermique — Poudres — Composition, conditions techniques de
fourniture Projection thermique — Poudres — Composition, conditions techniques de fourniture
ASME B46.1-2009 Texture de surface (rugosité de surface, ondulation et disposition)
Texture de surface (rugosité, ondulation et planéité de la surface)
EN 10204:2004 Produits métalliques — Types de documents de contrôle
Produits métalliques - Types de documents d'inspection
ISO 6508-1:2016 Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell — Partie 1 : Méthode
d'essai
Matériaux métalliques -- Essai de dureté Rockwell -- Partie 1 : Méthode d'essai
ISO 6508-2:2015 Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell
— Partie 2 : Vérification et étalonnage des machines d'essai
Matériaux métalliques -- Essai de dureté Rockwell -- Partie 2 : Vérification et étalonnage des
machines d'essai
ISO 6508-3:2015 Matériaux métalliques — Essai de dureté Rockwell
— Partie 3 : Étalonnage des blocs de référence
Matériaux métalliques - Essai de dureté Rockwell — Partie 3 : Étalonnage des blocs de référence
ISO 18265:2013 - Matériaux métalliques — Conversion des valeurs de dureté
Matériaux métalliques - Conversion des valeurs de dureté
Tableau des rapports de dureté de la dureté Rockwell, de la dureté Brinell, de la dureté Vickers et
de la dureté Knoop

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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