

Qu'est-ce qu'un Barres supérieures à rivets en alliage de tungstène

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 commerciale mondiale, devenant ainsi un fournisseur de solutions d'application complètes dans les domaines des produits chimiques à base de tungstène, des métaux tungstène, des carbures cémentés, des alliages haute densité, du molybdène et de ses alliages.

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Table des matières

Chapitre 1 Aperçu des barres de rivetage en alliage de tungstène

- 1.1 Définition des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 1.1.1 Caractéristiques structurelles des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 1.1.2 Caractéristiques de base des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 1.1.3 Positionnement des barres de rivetage en alliage de tungstène en science des matériaux
- 1.2 Analyse des principaux éléments des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 1.2.1 Rôle du tungstène dans les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 1.2.2 Intégration d'éléments métalliques auxiliaires dans les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 1.2.2.1 Effet de l'ajout de nickel sur les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 1.2.2.2 Effet de l'ajout de fer sur les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 1.2.2.3 Mécanisme du dopage au cuivre dans les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 1.2.2.4 Mécanisme de dopage par d'autres éléments dans les barres de rivetage en alliage de tungstène
- 1.3 Microstructure des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 1.3.1 Influence de la structure cristalline sur les performances des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 1.3.2 Observation du phénomène de séparation de phases dans les barres de rivetage en alliage de tungstène
- 1.4 Fondements théoriques des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 1.4.1 Application des diagrammes de phase des alliages aux barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 1.4.2 Influence des principes thermodynamiques sur les barres de rivetage en alliage de tungstène

Chapitre 2 Classification et analyse des barres de rivetage en alliage de tungstène

- 2.1 Classification des barres de rivetage en alliage de tungstène selon leur composition
 - 2.1.1 Barres de rivetage en alliage de tungstène haute densité
 - 2.1.2 Barres de rivetage en alliage de tungstène à faible densité
 - 2.1.3 Barres de rivetage en alliage de tungstène dopé aux terres rares
- 2.2 Classification des barres de rivetage en alliage de tungstène selon l'application
 - 2.2.1 Barres de rivetage en alliage de tungstène pour le domaine de la transformation mécanique
 - 2.2.2 Barres de rivetage en alliage de tungstène pour instruments de précision
 - 2.2.3 Barres de rivetage en alliage de tungstène pour environnements à haute température
 - 2.2.4 Barres de rivetage en alliage de tungstène pour environnements d'usure
- 2.3 Analyse des différences de performance des différents types de barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 2.3.1 Influence des variations de composition sur les propriétés physiques des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 2.3.2 Mise en œuvre d'une conception orientée application dans les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 2.3.3 Régulation des différences de microstructure sur les propriétés mécaniques des barres de rivetage en alliage de tungstène

Chapitre 3 Processus de préparation des barres de rivetage en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.1 Méthode de métallurgie des poudres pour les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.1.1 Étapes de préparation des matières premières pour la préparation des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.1.1.1 Purification et contrôle de la granulométrie de la poudre de tungstène
 - 3.1.1.2 Uniformité du mélange des éléments d'alliage
 - 3.1.2 Influence du procédé de frittage sur la densité des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.1.3 Optimisation de la technologie de formage par pression des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.1.4 Rôle du frittage en phase liquide dans la densification des barres de rivetage en alliage de tungstène
- 3.2 Technologie de traitement mécanique des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.2.1 Application du formage aux barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.2.2 Application de la déformation plastique aux barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.2.3 Optimisation de la microstructure par traitement thermique des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.2.4 Application du procédé de rectification de précision au traitement de surface des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.2.5 Application de l'usinage par électroérosion à l'obtention de formes complexes de barres de rivetage en alliage de tungstène
- 3.3 Caractérisation et contrôle qualité des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.3.1 Utilisation de l'analyse microscopique dans les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.3.2 Identification de la composition par des méthodes spectroscopiques dans les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.3.3 Importance des essais de densité dans l'évaluation de la qualité des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.3.4 Détection des défauts internes par techniques de contrôle non destructif dans les barres de rivetage en alliage de tungstène
- 3.4 Méthodes innovantes dans le processus de préparation des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.4.1 Potentiel du moulage par injection dans la production de barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 3.4.2 Influence de la technologie de fabrication additive sur la personnalisation des barres de rivetage en alliage de tungstène

Chapitre 4 Propriétés physiques des barres de rivetage en alliage de tungstène

- 4.1 Densité et propriétés thermiques des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 4.1.1 Principe de mesure de la densité des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 4.1.2 Contribution du coefficient de dilatation thermique à la stabilité des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 4.1.2.1 Comportement thermique des barres de rivetage en alliage de tungstène sous conditions de haute température
 - 4.1.2.2 Comportement des barres de rivetage en alliage de tungstène dans les environnements à basse température
 - 4.1.3 Application de la calorimétrie différentielle à balayage aux barres de rivetage en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 4.1.4 Quantification de la mesure de la conductivité thermique des barres de rivetage en alliage de tungstène
- 4.1.5 Rôle de la capacité thermique massique dans la gestion thermique des barres de rivetage en alliage de tungstène
- 4.2 Propriétés électriques et magnétiques des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 4.2.1 Performance de la conductivité électrique des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 4.2.2 Implications des paramètres magnétiques pour les applications des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 4.2.3 Influence du coefficient de température de résistance sur la stabilité électrique des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 4.2.4 Observation de l'analyse de la boucle d'hystérésis dans les barres de flambage de rivets en alliage de tungstène
- 4.3 Propriétés optiques et de rayonnement des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 4.3.1 Pertinence de l'analyse de réflectivité dans les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 4.3.2 Évaluation de la tolérance aux radiations des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 4.3.3 Caractérisation du spectre d'absorption dans les performances optiques des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 4.3.4 Contribution de la section efficace d'absorption des neutrons au blindage contre les rayonnements des barres de rivetage en alliage de tungstène
- 4.4 Fiche de données de sécurité des barres de rivetage en alliage de tungstène de CTIA GROUP LTD

Chapitre 5 Propriétés mécaniques des barres de rivetage en alliage de tungstène

- 5.1 Résistance et dureté des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 5.1.1 Méthodes d'essai de résistance à la traction des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 5.1.1.1 Mécanisme de rupture des barres de rivetage en alliage de tungstène sous charge statique
 - 5.1.1.2 Influence de la charge dynamique sur les barres de flambage des rivets en alliage de tungstène
 - 5.1.2 Quantification de la dureté Vickers des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 5.1.3 Évaluation par essais de traction sur des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 5.1.4 Évaluation par essai de compression des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 5.1.4.1 Recherche sur l'influence de la vitesse de déformation sur les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 5.1.4.2 Apports de l'analyse de la rupture des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 5.1.5 Vérification supplémentaire de la résistance à la flexion sur les propriétés mécaniques des barres de rivetage en alliage de tungstène
- 5.2 Ténacité et comportement en fatigue des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 5.2.1 Rôle de la ténacité à l'impact dans la durabilité des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 5.2.2 Application de l'analyse de fatigue cyclique aux barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 5.2.3 Méthodes de mesure de la ténacité à la rupture des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 5.2.4 Prédiction de la fatigue à grand nombre de cycles sur la durée de vie des barres de rivetage en alliage de tungstène
- 5.3 Caractéristiques de frottement et d'usure des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 5.3.1 Optimisation par mesure du coefficient de frottement pour les barres de rivetage en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.3.2 Discussion des mécanismes d'usure des barres de rivetage en alliage de tungstène
- 5.3.3 Analyse de l'usure abrasive et des dommages de surface des barres de rivetage en alliage de tungstène
- 5.3.4 Performance de l'usure adhésive dans le processus de contact des barres de rivetage en alliage de tungstène

Chapitre 6 Corrosion et durabilité des barres de rivetage en alliage de tungstène

- 6.1 Comportement à la corrosion électrochimique des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 6.1.1 Utilisation des courbes de polarisation dans la recherche sur la corrosion des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 6.1.2 Protection par formation d'une couche passive sur les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 6.1.2.1 Stabilité des barres de rivetage en alliage de tungstène en milieu acide
 - 6.1.2.2 Réponse des barres de rivetage en alliage de tungstène en milieu alcalin
 - 6.1.3 Caractérisation par mesure du potentiel de corrosion des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 6.1.4 Application de la spectroscopie d'impédance à la cinétique de corrosion des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 6.1.5 Réactions d'oxydation sur le comportement à la corrosion des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 6.1.6 Régulation des facteurs environnementaux sur les propriétés chimiques des barres de rivetage en alliage de tungstène
- 6.2 Mécanisme d'oxydation à haute température des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 6.2.1 Influence de la cinétique d'oxydation sur les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 6.2.2 Application de revêtements protecteurs sur les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 6.2.3 Destruction par formation d'oxyde volatil sur les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 6.2.4 Régulation des éléments d'alliage sur la résistance à l'oxydation des barres de rivetage en alliage de tungstène
- 6.3 Essais de durabilité environnementale des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 6.3.1 Évaluation par essai au brouillard salin des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 6.3.2 Rôle des cycles d'humidité dans la durabilité des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 6.3.3 Intégration de la simulation multi-échelle dans les barres de flambage des rivets en alliage de tungstène
 - 6.3.4 Essais de sensibilité à la fissuration par corrosion sous contrainte sur des barres de rivetage en alliage de tungstène

Chapitre 7 Applications des barres de rivetage en alliage de tungstène

- 7.1 Applications des barres de rivetage en alliage de tungstène dans les procédés de rivetage
 - 7.1.1 Rôle mécanique des barres de rivetage en alliage de tungstène dans le processus de formage des rivets
 - 7.1.2 Mécanisme d'interaction entre la barre de contreventement et le matériau du rivet
 - 7.1.2.1 Analyse de la distribution des contraintes de contact dans les applications des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 7.1.2.2 Influence de la coordination de la déformation sur la durabilité des barres de rivetage en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.1.3 Exigences de rivetage à haute résistance sur les performances des barres de rivetage en alliage de tungstène
- 7.1.4 Adaptabilité des barres de rivetage en alliage de tungstène dans les équipements de rivetage automatisés
- 7.2 Applications des barres de contre-rivage en alliage de tungstène dans les assemblages structuraux aérospatiaux
 - 7.2.1 Principes de sélection des barres de rivetage en alliage de tungstène pour le rivetage en alliage de titane
 - 7.2.2 Exigences relatives aux caractéristiques de surface des barres de rivetage en alliage de tungstène pour le rivetage de matériaux composites
 - 7.2.3 Analyse de la stabilité des barres de rivetage en alliage de tungstène sous environnement vibratoire
 - 7.2.4 Exigences particulières des procédés de rivetage à basse température sur les barres de rivetage en alliage de tungstène
- 7.3 Applications des barres de rivetage en alliage de tungstène dans la fabrication automobile et ferroviaire
 - 7.3.1 Adaptabilité des barres de rivetage en alliage de tungstène pour le rivetage de carrosseries légères
 - 7.3.2 Examen du comportement à l'usure des barres de rivetage en alliage de tungstène dans les procédés de rivetage à haute fréquence
 - 7.3.3 Compatibilité des barres de rivetage en alliage de tungstène dans les assemblages multi-matériaux
- 7.4 Applications des barres de rivetage en alliage de tungstène dans l'assemblage mécanique de précision
 - 7.4.1 Exigences du micro-rivetage sur la précision dimensionnelle des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 7.4.2 Rôle de la modification de surface dans les applications de précision des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 7.4.3 Exigence de pureté des matériaux pour les barres de rivetage en alliage de tungstène en environnement de salle blanche

Chapitre 8 Problèmes courants des barres de rivetage en alliage de tungstène

- 8.1 Formation de défauts lors du processus de préparation des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 8.1.1 Influence du frittage non uniforme sur la microstructure des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 8.1.2 Sources et contrôle de la contamination par les impuretés dans les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 8.1.3 Mécanisme d'amorçage des fissures lors de la phase de pressage des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 8.1.4 Analyse des causes de la porosité résiduelle dans les barres de rivetage en alliage de tungstène
- 8.2 Modes de défaillance lors de l'utilisation des barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 8.2.1 Mécanisme de rupture causé par une surcharge mécanique dans les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 8.2.2 Effet cumulatif de l'usure et de la fatigue dans les barres de rivetage en alliage de tungstène
 - 8.2.3 Réduction de la durée de vie des barres de rivetage en alliage de tungstène en raison des environnements corrosifs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2.4 Phénomène de fissuration causé par un choc thermique dans les barres de rivetage en alliage de tungstène

8.2.5 Influence de l'écaillage de surface sur le fonctionnement des barres de rivetage en alliage de tungstène

8.3 Optimisation des performances et diagnostic des défauts des barres de rivetage en alliage de tungstène

8.3.1 Atténuation des problèmes courants par ajustement de la composition des barres de rivetage en alliage de tungstène

8.3.2 Application des méthodes de contrôle non destructif à l'identification des défauts des barres de rivetage en alliage de tungstène

8.3.3 Amélioration de la durabilité par traitement thermique des barres de rivetage en alliage de tungstène

8.3.4 Amélioration de la résistance à l'usure par une technologie de renforcement de surface dans les barres de rivetage en alliage de tungstène

8.3.5 Rôle de l'analyse des cas de défaillance dans l'optimisation des barres de rivetage en alliage de tungstène

8.4 Comparaison des performances des barres de rivetage en alliage de tungstène avec d'autres matériaux de barres de rivetage

8.4.1 Comparaison des performances entre les barres de contre-pointe en carbure cémenté et les barres de contre-pointe à rivets en alliage de tungstène

8.4.2 Comparaison des performances des barres de contreventement en acier en remplacement des barres de contreventement à rivets en alliage de tungstène

8.4.3 Comparaison des performances des barres de poinçonnage en matériau céramique avec celles des barres de poinçonnage à rivets en alliage de tungstène

Annexes :

Annexe A Normes chinoises relatives aux barres de rivetage en alliage de tungstène

Annexe B Normes internationales pour les barres de rivetage en alliage de tungstène

Annexe C Normes relatives aux barres de rivetage en alliage de tungstène en Europe, en Amérique, au Japon, en Corée, etc.

Annexe D Glossaire des termes relatifs aux barres de rivetage en alliage de tungstène

Références



Tige supérieure de rivet en alliage de tungstène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.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

Chapitre 1 : Aperçu des têtes de rivets en alliage de tungstène

1.1 Définition de la tige supérieure de rivet en alliage de tungstène

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène sont des produits en alliage dont le tungstène est le composant principal. Ils sont généralement fabriqués par métallurgie des poudres et usinés en outils spécifiques en forme de tige, principalement utilisés pour le support et la mise en forme lors du rivetage. Ces mandrins sont placés à l'extrémité du rivet lors de la pose, servant de support inverse pour résister aux coups de marteau ou à la pression, permettant ainsi à la tête du rivet de se déformer en douceur et de former une liaison solide. L'alliage de tungstène est choisi pour sa densité et sa dureté élevées, lui permettant de conserver sa forme sous des impacts répétés tout en possédant une certaine ténacité pour éviter la rupture fragile. Le diamètre et la longueur du mandrin sont conçus selon les spécifications du rivet, et sa surface est souvent rectifiée avec précision pour assurer un bon ajustement avec l'extrémité du rivet.

Les mandrins en alliage de tungstène utilisent généralement des alliages tungstène-nickel-fer ou tungstène-nickel-cuivre. La phase liante confère la plasticité nécessaire, rendant le mandrin moins sujet à la fissuration lors de sa fabrication et de son utilisation. Le processus de préparation comprend le mélange de poudres, le pressage, le frittage et le traitement thermomécanique, avec un traitement thermique final pour ajuster la microstructure. La surface de travail du mandrin doit être lisse et plane afin de réduire le frottement et les dommages lors de la déformation du rivet. L'apparition des mandrins en alliage de tungstène a permis de résoudre le problème de durabilité insuffisante des mandrins en acier traditionnels pour les applications de rivetage haute résistance, notamment celles nécessitant de multiples utilisations, où leur durée de vie est plus stable.

D'un point de vue fonctionnel, les riveteuses en alliage de tungstène assurent non seulement un support mécanique, mais contribuent également, grâce à leur haute densité, à concentrer la transmission d'énergie, ce qui permet une déformation plus uniforme du rivet. La forme de leur face d'extrémité (plate, concave ou convexe) est variée afin de s'adapter à différents types de rivets. Lors de leur utilisation, la riveteuse est fixée à une riveteuse pneumatique ou manuelle, et l'opérateur contrôle la force appliquée pour réaliser l'assemblage. L'entretien des riveteuses en alliage de tungstène est relativement simple : un contrôle régulier de l'usure de surface et un polissage suffisent. En conclusion, en tant que composant essentiel des outils de rivetage, les riveteuses en alliage de tungstène, grâce à leurs propriétés intrinsèques, améliorent l'efficacité et la qualité du processus d'assemblage et sont de plus en plus reconnues dans le secteur de l'assemblage industriel.

1.1.1 Caractéristiques structurelles des barres supérieures de rivets en alliage de tungstène

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène se caractérisent principalement par leur forme cylindrique et leur microstructure interne biphasée. Leur conception externe privilégie l'adaptabilité fonctionnelle, tandis que leur microstructure interne garantit leur durabilité. De forme cylindrique, le mandrin présente une extrémité servant de surface de travail pour le contact direct avec la queue du rivet, et l'autre extrémité permettant une fixation aisée lors de son installation dans une riveteuse. La surface de travail est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

généralement plane ou comporte de légères rainures afin de mieux absorber la déformation de la queue du rivet, et ses faces lisses réduisent la résistance à l'utilisation. Le rapport longueur/diamètre est adapté à la taille du rivet pour assurer un support stable sans gêner les composants environnants.

La structure interne présente les caractéristiques typiques d'un alliage de tungstène biphasé : les particules de tungstène forment un squelette continu constituant la phase dure, tandis que des phases liantes, telles que le nickel-fer ou le nickel-cuivre, comblent les interstices, assurant la cohésion et la ténacité. Cette microstructure est obtenue par frittage, avec des particules de tungstène quasi sphériques et une phase liante uniformément répartie afin de prévenir la concentration des contraintes. Après travail à chaud, la microstructure présente une texture fibreuse, alignée axialement pour renforcer la résistance longitudinale. La surface est finement rectifiée, ce qui réduit la rugosité et l'adhérence des rivets.

Les caractéristiques structurelles comprennent également la conception de la face d'extrémité ; les barres supérieures concaves contribuent à former une tête de rivet en forme de champignon, tandis que les surfaces planes offrent un support temporaire aux rivets de grande surface. L'extrémité fixe est souvent filetée ou rainurée pour un raccordement rapide à la riveteuse. Les barres supérieures en alliage de tungstène sont compactes, d'un poids moyen et faciles à manipuler, manuellement ou automatiquement. Après traitement thermique, les contraintes internes sont relâchées et la structure est stabilisée pour résister à la fatigue par impact.

Du point de vue de l'utilisation, cette caractéristique structurelle optimise le transfert d'énergie dans le mandrin et améliore le contrôle de la zone de déformation lors du rivetage. La conception structurelle du mandrin en alliage de tungstène reflète des considérations pratiques d'ingénierie d'outillage, optimisant sa fonction de support grâce à la coordination de sa forme et de sa structure, et jouant un rôle stabilisateur sur les chaînes d'assemblage et lors des opérations de maintenance. Avec le développement de la technologie de rivetage, la structure du mandrin se perfectionne progressivement pour répondre à un plus grand nombre d'exigences d'assemblage.

1.1.2 Caractéristiques de base des barres supérieures de rivets en alliage de tungstène

Les mandrins à riveter en alliage de tungstène doivent leur qualité principalement à la combinaison de leurs propriétés matérielles et de leur conception fonctionnelle. Cet outil sert de support lors du rivetage et doit résister à des chocs et des pressions répétés tout en conservant sa forme. La haute densité de l'alliage de tungstène est l'un de ses atouts majeurs. Cette propriété permet au mandrin d'avoir une masse plus importante à volume égal, offrant ainsi un meilleur support inertiel et contribuant à concentrer le transfert d'énergie lors de la déformation de la queue du rivet, pour une liaison plus uniforme. La dureté élevée est une autre caractéristique importante. La phase tungstène forme une structure rigide résistante à l'usure, tandis que la phase liant assure une certaine ténacité, empêchant l'écaillage ou le sertissage lors d'une utilisation intensive. La résistance à la chaleur est également remarquable. L'alliage de tungstène a peu tendance à se ramollir sous l'effet des hautes températures localisées générées lors du rivetage, et le matériau du rivet n'adhère pas facilement à la surface, préservant ainsi la planéité de la surface de travail.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'usinabilité des mandrins en alliage de tungstène permet un formage de précision ; leur diamètre et la forme de leur face d'extrémité peuvent être adaptés au type de rivet. Le faible coefficient de frottement après polissage réduit la résistance lors de la déformation du rivet. Leur stabilité chimique les rend résistants à la corrosion par l'huile ou le liquide de refroidissement en atelier, et ils ne rouillent pas lors d'un stockage prolongé. Leur poids modéré facilite leur manipulation par les opérateurs et leur installation sans surcharge. Ces caractéristiques des mandrins en alliage de tungstène proviennent de leur structure biphasée, obtenue par métallurgie des poudres : les particules de tungstène sont uniformément réparties et une phase liante comble les interstices, ce qui leur confère des propriétés mécaniques équilibrées.

En pratique, ces caractéristiques se traduisent par une longue durée de vie, permettant à un même mandrin de supporter de multiples opérations de rivetage sans remplacement fréquent, et par la possibilité de restaurer une surface de travail usée par un simple polissage. Les mandrins en alliage de tungstène offrent également une excellente réponse acoustique, produisant un son net à l'impact, ce qui permet aux opérateurs d'évaluer facilement la qualité du rivetage. Ils présentent diverses formes d'extrémité : les têtes plates conviennent aux rivets standard, tandis que les têtes concaves permettent de créer des formes de tête spécifiques. Ces caractéristiques fondamentales font des mandrins en alliage de tungstène d'excellents outils pour les chaînes de montage et les travaux de maintenance, et ils deviennent progressivement un outil couramment utilisé pour le rivetage haute résistance. Grâce aux progrès réalisés dans le traitement des matériaux, ces caractéristiques sont constamment perfectionnées afin de s'adapter à des besoins d'assemblage toujours plus variés.

1.1.3 La place des têtes de rivets en alliage de tungstène en science des matériaux

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène appartiennent à la catégorie des matériaux d'outillage en alliages réfractaires haute densité. Ce positionnement découle de l'utilisation des alliages de tungstène dans la conception composite de phases dures et tenaces, comblant ainsi les lacunes en matière de résistance aux chocs des aciers à outils traditionnels. En science des matériaux, les alliages de tungstène sont considérés comme représentatifs des matériaux composites issus de la métallurgie des poudres, où les particules de tungstène sont liées à la phase liante par frittage en phase liquide ou par infiltration en phase fondue, formant des structures de pseudo-alliage ou d'alliage véritable. Les mandrins à rivets, en tant que produit spécifique de ce matériau, illustrent l'extension des applications des métaux réfractaires dans le domaine des outils fonctionnels.

La position des mandrins en alliage de tungstène souligne leur rôle dans la gamme des matériaux pour outils d'impact. Comparés au carbure de tungstène cémenté, les alliages de tungstène offrent un meilleur équilibre entre ténacité et résistance à la chaleur, tandis que, comparés à l'acier rapide, ils privilégient la densité et la résistance thermique. En recherche sur les matériaux, ces mandrins servent souvent d'études de cas pour analyser le comportement mécanique des microstructures biphasées, où les particules de tungstène assurent la dureté, tandis que la phase liante coordonne la déformation et absorbe l'énergie. Utilisés comme matériau d'outillage d'assemblage de précision, les mandrins en alliage de tungstène favorisent le développement du rivetage haute résistance, notamment pour les applications nécessitant une utilisation répétée. Dans une classification plus large des matériaux, les mandrins en alliage de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungstène appartiennent à la catégorie des matériaux structuraux fonctionnels, assurant à la fois un support mécanique et optimisant le transfert d'énergie grâce à leurs caractéristiques de densité. Les progrès en science des matériaux ont permis de faire évoluer ces mandrins, passant des substituts traditionnels à l'acier à des optimisations composites, les traitements de surface ou les microalliages améliorant encore leurs performances. Le rôle des mandrins en alliage de tungstène illustre l'évolution des alliages réfractaires, de la recherche fondamentale aux applications concrètes, en fournissant un support fiable en ingénierie d'assemblage. Grâce aux progrès des technologies d'assemblage, le rôle de ce matériau s'étend également, intégrant des éléments plus intelligents ou respectueux de l'environnement.

1.2 Analyse élémentaire principale des barres supérieures de rivets en alliage de tungstène

Les mandrins de rivetage en alliage de tungstène tirent parti de l'effet synergique du tungstène, composant principal, associé à d'autres métaux auxiliaires. Cette analyse permet de comprendre l'origine des performances du matériau lors du contreventement par impact. Le tungstène confère à l'alliage une densité et une dureté élevées, tandis que des éléments auxiliaires tels que le nickel, le fer ou le cuivre optimisent le compromis entre usinabilité et ténacité. Les proportions des éléments sont définies à partir des diagrammes de phase et du comportement au frittage : une teneur élevée en tungstène assure la densité, tandis que l'ajout approprié d'éléments auxiliaires favorise une microstructure homogène.

Les mandrins en alliage de tungstène répondent à des exigences fonctionnelles : une densité élevée pour une bonne transmission de l'énergie d'impact, une dureté suffisante pour résister à l'usure et une ténacité à toute rupture fragile. Les propriétés réfractaires du tungstène se traduisent par une stabilité à haute température du mandrin, tandis que les éléments auxiliaires abaissent la température de transition fragile, permettant ainsi sa mise en œuvre à température ambiante. L'intégration des éléments est réalisée par métallurgie des poudres, avec un mélange homogène suivi d'un frittage pour former une structure biphasée. L'analyse porte également sur le contrôle des impuretés ; l'oxygène ou le carbone résiduels peuvent induire des défauts, nécessitant une gestion rigoureuse de la purification. L'analyse élémentaire des mandrins en alliage de tungstène constitue un élément clé pour l'optimisation des procédés, garantissant ainsi la stabilité de l'outil lors des opérations de rivetage. Grâce aux progrès de la recherche sur les matériaux, l'analyse élémentaire est de plus en plus précise et s'adapte à un nombre croissant d'applications d'assemblage.

1.2.1 Le rôle du tungstène dans les mandrins à rivets en alliage de tungstène

Le rôle principal du tungstène dans les mandrins de rivetage en alliage de tungstène est d'assurer une densité et une dureté élevées. Ceci garantit la stabilité dimensionnelle du mandrin et une transmission efficace de l'énergie lors des impacts de rivetage. Élément principal, le tungstène possède une masse atomique importante et une structure cristalline compacte, formant une matrice dure dans le mandrin qui résiste à l'usure et aux déformations de la surface de travail. Lors du rivetage, le mandrin subit des martelages répétés ; la dureté élevée du tungstène réduit la déformation de surface, maintient un contact précis avec la queue du rivet et contribue à la formation uniforme de la tête du rivet. La résistance thermique du tungstène joue également un rôle important dans l'utilisation des mandrins. Lors d'un échauffement localisé par friction, la phase tungstène a peu tendance à se ramollir, ce qui minimise les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

variations dimensionnelles globales du mandrin et prévient les dommages dus à la fatigue thermique. La haute densité du tungstène concentre la masse du mandrin, ce qui augmente son inertie à volume égal, améliore le transfert d'énergie d'impact au rivet et renforce la solidité de l'assemblage. Lors du frittage, la distribution sphérique des particules de tungstène réduit l'énergie de surface, favorisant la densification et, par conséquent, la porosité interne et la résistance du mandrin.

Le rôle du tungstène se manifeste également par sa stabilité chimique. Exposée à l'environnement de l'atelier, la phase tungstène présente une forte résistance à l'oxydation, empêchant la formation d'une couche poreuse en surface et préservant un aspect lisse. Même après l'ajout d'éléments auxiliaires, la phase tungstène reste prédominante, assurant une usure lente de la mandrin lors d'une utilisation prolongée. Le rôle du tungstène dans les mandrins de rivetage en alliage de tungstène illustre la contribution fondamentale des métaux réfractaires aux matériaux d'outillage. Grâce à leur densité et leur dureté, ils garantissent des procédés de rivetage fiables et présentent un intérêt pratique indéniable dans le domaine de l'assemblage.

1.2.2 Intégration d'éléments métalliques auxiliaires dans les tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

L'intégration d'éléments métalliques auxiliaires dans les mandrins de rivets en alliage de tungstène est principalement réalisée par l'intermédiaire d'une phase liante. Ces éléments, tels que le nickel, le fer ou le cuivre, se combinent aux particules de tungstène pour former une structure biphasée, améliorant ainsi la ténacité globale et l'adaptabilité à la mise en œuvre. Le processus d'intégration est achevé lors des étapes de mélange et de frittage des poudres. La poudre d'élément auxiliaire est répartie uniformément entre les particules de tungstène, fondant et imprégnant ces dernières lors du frittage en phase liquide, comblant les interstices et établissant des liaisons. Chimiquement, les éléments auxiliaires présentent une faible miscibilité avec le tungstène, maintenant des limites de phase nettes, tandis que la phase liante assure la coordination de la déformation et réduit la fragilité du mandrin.

L'intégration permet de compenser la dureté élevée du tungstène, tandis que les éléments auxiliaires abaissent la température de transition fragile à température ambiante, permettant ainsi au mandrin d'absorber l'énergie sous les charges d'impact et d'éviter une rupture brutale. Le nickel est couramment utilisé comme élément auxiliaire principal ; sa ductilité élevée améliore l'aptitude au travail à froid du mandrin après intégration, facilitant ainsi la rectification de précision de la face d'extrémité. L'ajout de fer ou de cuivre permet d'ajuster la densité ou la conductivité thermique, et le taux d'intégration est adapté aux spécifications du mandrin. Le traitement thermique post-frittage favorise la diffusion des éléments, améliore la résistance de la liaison interfaciale et renforce la résistance à la fatigue du mandrin.

L'intégration d'éléments auxiliaires influe également sur les propriétés de surface ; la phase liante exposée améliore la résistance à la corrosion et la stabilité du mandrin est accrue en milieu humide. L'uniformité de l'intégration est assurée par broyage à billes de la poudre ou par séchage par atomisation afin d'éviter les fluctuations de performance dues à une agglomération localisée. L'intégration d'éléments métalliques auxiliaires dans les mandrins en alliage de tungstène illustre la conception synergique des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

matériaux composites, optimisant les performances globales de l'outil grâce à l'effet de pontage de la phase liante et assurant une base fiable pour les supports de rivetage.

1.2.2.1 Effet de l'ajout de nickel sur les tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

L'ajout de nickel aux mandrins de rivets en alliage de tungstène améliore principalement leur ténacité et leur usinabilité. Cet effet permet au mandrin d'absorber davantage d'énergie lors d'impacts, réduisant ainsi le risque de rupture fragile. En tant qu'élément liant clé, le nickel forme une solution solide cubique à faces centrées lors du frittage, encapsulant les particules de tungstène et créant des canaux de déformation continus. Chimiquement, le nickel présente une bonne mouillabilité avec le tungstène, ce qui induit un écoulement uniforme en phase liquide, favorisant le réarrangement et la densification des particules et conduisant à une structure interne plus dense dans le mandrin.

L'ajout de nickel améliore la plasticité à température ambiante de la barre d'éjection, la rendant moins sujette à la fissuration lors d'opérations de travail à froid telles que le meulage ou le tournage, et facilitant l'obtention de la finition de surface requise. Dans les applications par impact, le nickel contribue à équilibrer la répartition des contraintes des particules de tungstène, réduisant ainsi le risque d'ébréchure ou de déformation de la surface de travail de la barre d'éjection et assurant une durée de vie plus stable. La résistance à la corrosion du nickel est également transmise à la surface de la barre d'éjection, la protégeant ainsi des huiles et de l'humidité présentes dans l'atelier et garantissant sa propreté.

La proportion de nickel ajouté influe sur l'équilibre des effets ; une quantité appropriée améliore significativement la ténacité, tandis qu'une quantité excessive diminue légèrement la densité. Après traitement thermique, la phase nickel devient plus homogène, l'adhérence interfaciale est renforcée et la résistance à la fatigue du mandrin est améliorée. L'effet de l'ajout de nickel sur les mandrins de rivetage en alliage de tungstène reflète l'effet de renforcement d'un liant, contribuant à la durabilité de l'outil lors du rivetage grâce à la coordination interfaciale et apportant une valeur ajoutée pratique dans les applications d'assemblage.

1.2.2.2 Effet de l'ajout de fer sur les tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

L'ajout de fer dans les mandrins de rivetage en alliage de tungstène forme principalement un système de phase liante avec le nickel, créant une solution solide nickel-fer. Cet ajout influence significativement les propriétés mécaniques et les caractéristiques de mise en œuvre du mandrin. Le fer est infiniment miscible avec le nickel, abaissant la température d'apparition du liquidus lors du frittage, favorisant le réarrangement et la densification des particules de tungstène, et ajustant simultanément l'énergie de défaut d'empilement de la phase liante, la rendant plus sujette au glissement dévié et au maclage. L'ajout de fer renforce l'effet de blocage des dislocations par la phase liante, améliorant ainsi la limite d'élasticité et la résistance à la fatigue du mandrin. Dans un environnement de rivetage par impact répété, la surface de travail du mandrin est moins sujette aux microfissures et aux déformations.

L'ajout de fer renforce les propriétés magnétiques du mandrin, une caractéristique exploitable pour le serrage ou le positionnement magnétique dans certaines applications d'assemblage, facilitant ainsi

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'automatisation. Le fer améliore également la résistance à l'oxydation de la phase liante, formant une couche protectrice plus dense en surface et rendant le mandrin moins sensible à la corrosion localisée en milieux humides ou huileux. Le rapport fer/nickel influe sur l'intensité de cet effet ; une teneur modérée en fer offre un bon compromis entre ténacité et résistance, réduisant le risque d'écaillage des arêtes lors d'opérations de travail à froid telles que le tournage ou la rectification. Lors du traitement thermique, le fer favorise la distribution uniforme des phases précipitées, renforçant ainsi la microstructure. L'ajout de fer contribue également à la stabilité thermique du mandrin ; lors d'un recuit à haute température, le fer inhibe la croissance excessive de la phase liante, maintenant une structure à grains fins et minimisant les variations dimensionnelles lors de l'échauffement par friction localisée. L'efficacité économique du fer fait du système tungstène-nickel-fer un choix courant, grâce à la disponibilité des matières premières et à des coûts de production relativement maîtrisables. L'ajout de fer a également un impact sur la réponse acoustique : le son à l'impact est plus feutré, ce qui permet aux opérateurs d'évaluer plus facilement la force de rivetage. L'ajout de fer aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène démontre l'effet de renforcement des éléments auxiliaires dans la phase de liaison. En synergie avec le nickel, il optimise les performances globales du mandrin et apporte une réelle valeur ajoutée dans le domaine des outils de rivetage.

1.2.2.3 Mécanisme du dopage au cuivre dans les mandrins à rivets en alliage de tungstène

Le dopage au cuivre des mandrins de rivets en alliage de tungstène se manifeste principalement par la formation d'une phase liante non magnétique et l'amélioration de la conductivité thermique. Ce mécanisme est adapté aux applications de rivetage exigeant d'éviter les interférences magnétiques ou une dissipation thermique rapide. Le cuivre et le nickel sont parfaitement miscibles et forment une solution solide cubique à faces centrées dans le système tungstène-nickel-cuivre. Lors du frittage, la phase liquide s'écoule et imprègne les particules de tungstène, favorisant leur réarrangement et leur densification. Parallèlement, la conductivité thermique élevée du cuivre permet une montée en température plus progressive du mandrin lors du chauffage par impact, réduisant ainsi la concentration des contraintes thermiques.

L'intérêt principal du dopage au cuivre réside dans sa contribution à l'uniformité de la microstructure. La phase cuivre comble les interstices de la structure en tungstène, formant un réseau continu. Chimiquement, le cuivre présente un faible angle de mouillage avec le tungstène, ce qui assure une interface propre et une dispersion d'énergie plus homogène lors des essais d'impact. La ductilité élevée du cuivre améliore la plasticité à température ambiante de la broche d'éjection, optimisant ainsi son aptitude au formage à froid et facilitant le moulage de précision des faces d'extrémité complexes. Le dopage au cuivre induit également un effet amagnétique, évitant les interférences lorsque la broche d'éjection est utilisée à proximité d'équipements de serrage magnétique, ce qui la rend compatible avec les chaînes d'assemblage électronique.

Le cuivre module également le comportement de dilatation thermique du mécanisme, réduit les contraintes internes grâce à son association avec le tungstène et minimise la tendance à la fissuration sous l'effet des cycles thermiques du mandrin. En termes de propriétés de surface, la phase de cuivre exposée améliore la résistance à la corrosion, et le mandrin résiste aux huiles et aux produits de nettoyage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le taux de dopage en cuivre influe sur les performances du mécanisme ; à un niveau approprié, la conductivité thermique et la ténacité sont équilibrées. Après traitement thermique, la phase de cuivre devient plus homogène, ce qui améliore la résistance à la fatigue du mandrin. Le dopage au cuivre permet l'intégration fonctionnelle de la phase conductrice dans le matériau composite, optimisant le comportement thermomécanique du mandrin par remplissage du réseau et jouant un rôle stabilisateur dans les supports de rivetage.

1.2.2.4 Mécanisme de dopage d'autres éléments dans les mandrins de rivets en alliage de tungstène

Le dopage d'autres éléments dans les mandrins de rivets en alliage de tungstène est principalement réalisé par microalliage ou renforcement par dispersion. Ces éléments, tels que le cobalt, le molybdène ou les composés de terres rares, sont ajoutés en faibles quantités pour affiner la microstructure ou améliorer des propriétés spécifiques. Le dopage au cobalt renforce la phase liante ; chimiquement, le cobalt réduit l'énergie de défaut d'empilement et favorise la déformation par maclage, améliorant ainsi la résilience du mandrin. Le molybdène remplace partiellement le tungstène, régulant la dilatation thermique et la température de recristallisation, ce qui confère au mandrin une meilleure stabilité dimensionnelle à haute température .

Les terres rares, comme le lanthane ou l'yttrium, sont dispersées sous forme d'oxydes, bloquant les joints de grains et limitant ainsi leur migration, tout en augmentant la température de recristallisation. Il en résulte des grains fins dans les mandrins après formage à chaud, ce qui améliore leur résistance et leur durabilité. L'ajout de faibles quantités de carbures, comme le carbure de titane, forme une troisième phase de renforcement, augmentant encore la dureté superficielle des mandrins et leur résistance à l'usure par rivetage. Mécaniquement, ces éléments se ségrègent aux interfaces ou aux joints de grains lors du frittage, modifiant l'énergie de surface et les voies de diffusion, ce qui conduit à une microstructure plus dense et plus uniforme.

Le mécanisme de dopage comprend également un effet purificateur : les terres rares captent les impuretés d'oxygène et de soufre pour former des composés stables et réduire les inclusions fragiles. Le dopage composite cobalt-molybdène renforce le matériau de manière synergique, ce qui confère au mandrin des performances globales équilibrées. Un contrôle strict de la quantité de dopant est maintenu afin d'éviter l'introduction excessive de nouvelles phases susceptibles d'altérer la ténacité. Le traitement thermique active le matériau, tandis que la mise en solution et le vieillissement provoquent la précipitation de fines particules. Les mécanismes de dopage des autres éléments démontrent l'optimisation du matériau par microalliage ; des améliorations ciblées des performances des mandrins en alliage de tungstène sont obtenues par de faibles ajouts, contribuant ainsi à des améliorations pratiques des outils de rivetage.

1.3 Microstructure de la barre supérieure du rivet en alliage de tungstène

La microstructure des mandrins de rivets en alliage de tungstène est caractérisée par une structure composite biphasée. Les particules de tungstène, constituant la phase dure, sont encapsulées par une phase liante, formant une microstructure de type cermet. Cette structure, issue de la métallurgie des poudres, a évolué après frittage et formage à chaud. Les particules de tungstène sont majoritairement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

quasi sphériques ou polyédriques, et leur distribution granulométrique influe sur le compromis entre résistance et ténacité. La phase liante remplit les espaces interparticulaires, assurant des canaux de déformation continus. La couche interfaciale est cruciale pour la structure ; la zone de transition formée par diffusion des éléments renforce la liaison. Les défauts tels que la porosité ou la ségrégation au sein de la structure doivent être maîtrisés afin de préserver la résistance aux chocs du mandrin.

L'observation microstructurale utilise généralement la microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie électronique à transmission (MET) pour révéler le degré de sphéroïdisation des particules et l'uniformité de la distribution des phases. Le laminage induit une texture fibreuse, alignée axialement pour renforcer la résistance longitudinale. Le traitement thermique ajuste la taille des grains et les phases précipitées, optimisant ainsi les performances. La microstructure des mandrins en alliage de tungstène illustre les principes de conception des composites en alliages réfractaires, garantissant la stabilité des outils de rivetage grâce à la coordination interphase et assurant un support fiable pour les applications d'assemblage.

1.3.1 Influence de la structure cristalline sur les performances des goujons de rivet en alliage de tungstène

L'influence de la structure cristalline sur les performances des mandrins de rivetage en alliage de tungstène se manifeste principalement par l'interaction entre le réseau cubique centré de la phase tungstène et le réseau cubique à faces centrées de la phase liante. Cette influence détermine la dureté, la ténacité et la résistance à la fatigue du mandrin. Les particules de tungstène conservent une structure cubique centrée, avec un nombre limité de systèmes de glissement mais une dureté élevée, assurant un support rigide sous les charges d'impact et résistant à la déformation de la surface de travail. La phase liante, grâce à ses nombreux systèmes de glissement cubiques à faces centrées, présente une forte capacité de coordination des déformations, absorbe l'énergie d'impact et prévient la rupture fragile du mandrin. L'orientation cristalline induit une texture lors de la fabrication, avec un allongement des grains dans le sens du laminage, augmentant ainsi la résistance axiale.

L'influence de la structure cristalline se reflète également dans l'adaptation des interfaces. Le désaccord de maille entre le tungstène et la phase liante génère un champ de contraintes, qui est relâché par traitement thermique, ce qui confère une liaison plus stable. Le recuit induit une recristallisation et l'affinage des grains améliore le compromis entre résistance et ténacité. Les impuretés se séparent aux joints de grains, altérant la stabilité structurale ; les procédés de purification atténuent ces effets. Les défauts cristallins, tels que les dislocations, se multiplient sous l'effet d'un impact, et la phase liante se régénère rapidement, ce qui améliore la résistance à la fatigue du mandrin.

Lors des cycles thermiques, la différence de dilatation thermique de la structure cristalline génère des microcontraintes, mais la phase liante amortit ces contraintes, assurant ainsi la stabilité dimensionnelle du mandrin. Les cristaux exposés en surface influent sur l'usure ; le polissage réduit le frottement en créant une surface cristalline lisse. L'influence de la structure cristalline sur les performances des mandrins de rivetage en alliage de tungstène illustre le principe de synergie phase-réseau en science des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

matériaux. L'optimisation structurale contribue à la durabilité de l'outil, apportant une valeur ajoutée concrète aux opérations de rivetage.

1.3.2 Observation du phénomène de séparation de phases dans les tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

L'observation de la séparation de phases dans les mandrins de rivets en alliage de tungstène repose principalement sur l'étude de la distribution des phases de tungstène et de liant. Ce phénomène résulte de l'écoulement de la phase liquide et de la précipitation lors du refroidissement pendant le frittage, se manifestant par la sphéroïdisation et la séparation des particules de tungstène et le remplissage du réseau par la phase de liant. La microscopie électronique à balayage (MEB) en mode rétrodiffusion est couramment utilisée pour l'observation ; la phase de tungstène, de numéro atomique plus élevé, apparaît plus claire, tandis que la phase de liant apparaît plus sombre, créant un contraste marqué. Les particules de tungstène sont quasi sphériques, leur espacement étant déterminé par le volume de la phase de liant ; cette séparation uniforme favorise la dispersion des contraintes.

L'observation de la séparation de phases a également révélé une couche de transition interfaciale où la diffusion des éléments forme une zone de gradient, renforçant l'adhérence et empêchant le délaminage. Un frittage insuffisant entraîne une séparation incomplète et des pores résiduels ; un frittage excessif conduit à un grossissement des particules, une séparation excessive et une diminution de la ténacité. Après mise en forme à chaud, la séparation de phases s'étend dans le sens de la déformation, formant une structure fibreuse, et l'observation en coupe transversale révèle une distribution stratifiée. Le recuit favorise l'homogénéisation de la séparation de phases, aboutissant à des précipités fins et dispersés.

La vitesse de refroidissement influe sur le phénomène de séparation ; un refroidissement rapide fige une séparation fine, tandis qu'un refroidissement lent entraîne une légère croissance des particules. Les impuretés s'agglomèrent aux interfaces de phases sous forme de points sombres ; la purification atténue ce phénomène. L'observation de la séparation de phases dans les mandrins de rivetage en alliage de tungstène révèle le processus de formation des structures composites. L'analyse microscopique permet d'ajuster le procédé, garantit la stabilité des performances du mandrin et lui permet de jouer un rôle dans les outils de rivetage.

1.4 Base théorique des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

La fabrication des mandrins à rivets en alliage de tungstène repose principalement sur l'analyse des diagrammes de phases de l'alliage et sur les principes thermodynamiques. Ces fondements permettent d'expliquer les changements de comportement du matériau lors de sa préparation et de son utilisation. Les diagrammes de phases fournissent un cadre de référence pour les interactions entre les éléments, révélant la solubilité et l'équilibre de phases du tungstène avec les métaux auxiliaires, tandis que la thermodynamique analyse la faisabilité et la stabilité du procédé d'un point de vue énergétique. L'application de cette base théorique rend la conception des mandrins plus scientifique : du choix de la composition aux paramètres de procédé, tout est basé sur les données des diagrammes de phases et les calculs énergétiques, évitant ainsi les ajustements approximatifs.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La théorie des diagrammes de phase appliquée aux mandrins permet de prédire la région de phase liquide des systèmes tungstène-nickel-fer ou tungstène-nickel-cuivre. La température de frittage est définie en fonction du diagramme de phase afin de garantir une quantité appropriée de phase liquide, favorisant ainsi le réarrangement des particules. Les principes thermodynamiques impliquent des variations d'énergie libre de Gibbs, qui pilotent le mécanisme de dissolution-reprécipitation ; la densification de la microstructure du mandrin repose sur un processus à énergie libre négative. Le cadre théorique inclut également le concept d'énergie interfaciale ; la réduction de l'énergie de surface des particules de tungstène favorise la sphéroïdisation, ce qui améliore la résistance aux chocs du mandrin.

L'équilibre thermodynamique favorise la relaxation des contraintes lors du recuit, et les contraintes résiduelles dans le mandrin minimisent l'énergie par diffusion. L'analyse de la stabilité à haute température du mandrin repose sur l'étude combinée des diagrammes de phase et de la thermodynamique, tandis que les calculs de vitesse de diffusion des éléments contribuent à optimiser le temps de maintien. Le cadre théorique des mandrins en alliage de tungstène illustre la nature multidisciplinaire de la science des matériaux, permettant la prédiction des performances des outils grâce aux diagrammes de phase et aux principes énergétiques, et fournissant un appui théorique aux applications de rivetage.

1.4.1 Application des diagrammes de phase des alliages aux tiges de rivet en alliage de tungstène

L'utilisation des diagrammes de phases des alliages de tungstène pour la fabrication de mandrins à rivets guide principalement la conception de la composition et le choix des paramètres de procédé. Cette utilisation permet de prédire l'équilibre de phases entre les éléments et le comportement en fonction de la température, garantissant ainsi une microstructure stable du mandrin et des performances constantes. Le diagramme de phases représente les zones de miscibilité du tungstène avec des métaux auxiliaires tels que le nickel et le fer. La composition du mandrin est fixée dans la limite de la solution solide afin d'éviter la formation de phases indésirables. La zone de phase liquide est utilisée lors du frittage ; le chauffage du mandrin à la température indiquée dans le diagramme de phases favorise la fusion et le mouillage de la phase liante et des particules de tungstène, permettant ainsi un réarrangement et une densification.

Les diagrammes de phase sont également utilisés lors du traitement thermique. La température de recristallisation est estimée à partir du diagramme de phase, et le recuit du mandrin permet d'éviter les températures excessivement élevées susceptibles d'entraîner un grossissement des grains. Le diagramme de phase binaire tungstène-nickel met en évidence une séparation à basse température ; lors du refroidissement du mandrin, ce diagramme guide le contrôle de la précipitation, assurant une distribution fine et améliorant la ténacité. Le diagramme de phase tungstène-fer est utilisé pour ajuster le magnétisme ; en milieu non magnétique, la teneur en fer du mandrin est réduite afin de correspondre à la zone non magnétique du diagramme. Pour les extensions multi-éléments du diagramme de phase, telles que la phase ternaire tungstène-nickel-fer, l'optimisation du rapport du mandrin se réfère à la ligne de liquidus, en équilibrant mouillage et résistance. Dans ces applications, un logiciel de simulation de diagrammes de phase facilite la prédiction, et des essais sur mandrin valident les données du diagramme. L'application des diagrammes de phase aux mandrins illustre la pertinence de la théorie pour la pratique, garantissant la fiabilité de la préparation des matériaux par l'analyse d'équilibre et apportant une valeur pratique dans le domaine des outils de rivetage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.4.2 Influence des principes thermodynamiques sur les tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

Les principes thermodynamiques régissant les mandrins de rivetage en alliage de tungstène influencent principalement la faisabilité et la stabilité du procédé grâce aux variations d'énergie. Cette influence persiste du frittage à l'utilisation, contribuant à l'analyse du comportement du mandrin. Le principe de l'énergie libre de Gibbs induit la formation d'une phase liquide lors du frittage ; les valeurs négatives favorisent le réarrangement des particules, et la densification du mandrin dépend du chemin de minimisation de l'énergie. Les variations d'enthalpie influencent le processus de chauffage : à mesure que la température du mandrin augmente, il absorbe de la chaleur, et la fusion de la phase liante fournit l'énergie d'écoulement.

Le principe d'augmentation de l'entropie se manifeste par la diffusion : lors du traitement thermique du mandrin, la distribution aléatoire des éléments accroît l'entropie, ce qui stabilise l'interface. La thermodynamique de l'équilibre de phase guide l'ajustement de la composition, et le rapport des éléments auxiliaires du mandrin est déterminé par la courbe d'énergie libre afin d'éviter la formation de phases à haute énergie. Les effets thermodynamiques incluent également la relaxation des contraintes ; lors du recuit du mandrin, l'énergie résiduelle est réduite par diffusion, restaurant ainsi ses performances. Dans les applications soumises à des chocs, l'analyse thermodynamique du transfert d'énergie permet de concentrer l'énergie cinétique, et le processus de déformation obéit au principe de conservation de l'énergie. La thermodynamique de l'oxydation prédit le comportement de surface, et le calcul de l'énergie libre du mandrin à l'air libre oriente la protection du revêtement. L'influence des principes thermodynamiques sur les mandrins de rivetage en alliage de tungstène reflète une compréhension énergétique des matériaux, et l'application de ces principes contribue à l'optimisation des performances de l'outil, jouant un rôle de guide dans la pratique du rivetage.



Tête supérieure de rivet en alliage de tungstène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 2 Classification et analyse des têtes de rivets en alliage de tungstène

2.1 Classification des têtes de rivets en alliage de tungstène selon leur composition

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène sont classés principalement selon la nature des éléments de la phase liante, ce qui explique les différences systématiques de densité, de ténacité, d'aptitude à la mise en œuvre et de coût. Parmi les catégories courantes, on trouve les systèmes tungstène-nickel-fer (TNI), les systèmes tungstène-nickel-cuivre (TNC) et d'autres systèmes dérivés. Le tungstène est l'élément dominant, présent en forte proportion, et la proportion des autres éléments de la phase liante est ajustée pour optimiser les performances. Les systèmes TNI privilégient la résistance mécanique et les propriétés magnétiques, tandis que les systèmes TNC privilégient les propriétés non magnétiques et la conductivité thermique. Les catégories à haute densité visent à maximiser la teneur en tungstène.

La classification repose sur les diagrammes de phase et le comportement au frittage. Le nickel, élément liant de base, est miscible avec d'autres métaux pour former des solutions solides. L'ajout de fer ou de cuivre modifie les propriétés de phase. En production, la classification compositionnelle oriente la formulation des poudres et les procédés de fabrication. Les systèmes tungstène-nickel-fer présentent des températures de frittage en phase liquide plus élevées, tandis que les systèmes tungstène-nickel-cuivre sont plus faciles à travailler à froid. La classification prend également en compte l'adaptabilité aux applications : les tiges de poussée magnétiques conviennent à des applications de serrage spécifiques, tandis que les tiges de poussée non magnétiques sont utilisées pour l'assemblage électronique. Le contrôle des impuretés est un critère universel, avec de faibles teneurs en oxygène et en carbone afin d'éviter la fragilisation.

La classification basée sur la composition fournit un cadre pour la sélection des mandrins. Les ingénieurs classent les catégories en fonction du matériau des rivets et des conditions d'utilisation ; les systèmes tungstène-nickel-fer offrent une haute résistance aux chocs, tandis que les systèmes tungstène-nickel-cuivre assurent une bonne stabilité de surface. Ce système de classification évolue au fil des recherches sur les matériaux, l'ajout de terres rares ou de cobalt ouvrant de nouvelles perspectives.

2.1.1 Barre supérieure de rivet en alliage de tungstène haute densité

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène haute densité se caractérisent par leur forte teneur en tungstène. Ces mandrins tirent parti de la masse concentrée au niveau du support de rivetage, ce qui génère une force de réaction inertielle et une efficacité de transfert d'énergie accrues, permettant ainsi une déformation plus uniforme et complète du rivet. La haute densité est obtenue en réduisant la proportion de la phase liante, les particules de tungstène étant prédominantes. Après frittage, la microstructure est dense et moins poreuse, ce qui se traduit par une masse totale plus importante à volume égal et une force de réaction plus stable à l'impact.

La structure du mandrin haute densité est principalement composée d'un squelette en tungstène, les particules étant enrobées d'une fine couche de liant, ce qui assure une forte adhérence interfaciale. La surface de travail du mandrin présente une dureté élevée, résistant aux indentations répétées au niveau

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la queue du rivet. Lors de sa fabrication, le lingot haute densité est laminé à chaud et mis en forme ; l'écrouissage nécessite un recuit auxiliaire pour relâcher les contraintes et prévenir la fissuration. Après rectification, la surface est lisse, ce qui réduit l'adhérence du rivet. Le mandrin présente de faibles vibrations et un fonctionnement stable lorsqu'il est utilisé dans des équipements de rivetage à grande vitesse.

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène haute densité sont adaptés au support de rivets de grande taille ou à haute résistance. La haute densité du tungstène concentre l'énergie dans le rivet, assurant ainsi une résistance de liaison constante. Ils présentent une bonne stabilité thermique, avec une déformation minimale lors d'un échauffement localisé, ce qui prolonge leur durée de vie. Ils possèdent également une excellente stabilité chimique, avec une faible corrosion en atelier et un entretien minimal. Parmi les variantes haute densité, on trouve également des versions en tungstène-nickel-fer pour le positionnement magnétique et des versions en tungstène-nickel-cuivre pour les applications non magnétiques en assemblage électronique.

En production, la poudre de tungstène fine est utilisée pour augmenter la densité des têtes de rivets haute densité. Un frittage et un maintien prolongés favorisent le réarrangement des grains. Le traitement thermique ajuste la microstructure, et le recuit affine le grain pour optimiser la ténacité. Ces propriétés des têtes de rivets haute densité découlent des avantages intrinsèques du tungstène, assurant un support fiable pour les outils de rivetage et s'imposant progressivement comme un choix courant pour les applications exigeantes. Avec la diversification des exigences d'assemblage, le champ d'application des têtes de rivets en alliage de tungstène haute densité s'élargit également, contribuant à des améliorations concrètes des procédés d'assemblage.

2.1.2 Barre supérieure de rivet en alliage de tungstène à faible densité

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène à faible densité constituent une variante dont la densité globale est réduite par ajustement de la composition ou par l'introduction d'éléments légers. Ces mandrins préservent un équilibre entre la dureté et la ténacité intrinsèques de l'alliage de tungstène tout en réduisant le poids, facilitant ainsi la gestion de la charge pour l'opérateur et l'équipement. Les conceptions à faible densité réduisent généralement la teneur en tungstène ou le remplacent partiellement par du molybdène, ce qui augmente la proportion de la phase liante. La microstructure après frittage demeure un composite biphasé, mais le squelette de particules de tungstène est relativement clairsemé, tandis que le réseau de cuivre ou de nickel est plus continu. Bien que la dureté de la surface de travail du mandrin soit légèrement inférieure à celle du modèle à haute densité, elle est suffisante pour résister aux chocs typiques du rivetage, et l'usure de surface est uniforme.

Les mandrins en alliage de tungstène à faible densité sont principalement constitués d'une phase liante, la coordination de la déformation étant leur caractéristique principale. Les particules de tungstène assurent le support nécessaire, ce qui permet une absorption d'énergie plus douce lors des impacts et réduit le jeu des machines. L'usinabilité améliorée facilite le laminage à froid et à chaud pour obtenir des barres minces ou longues, ainsi qu'un formage flexible des faces d'extrémité. La stabilité thermique dépend toujours de la phase tungstène ou molybdène, avec une déformation minimale lors d'un chauffage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

localisé. La bonne stabilité chimique facilite le plaquage ou le polissage de la surface, qui résiste à la corrosion en milieu d'atelier.

Ces mandrins conviennent aux équipements de rivetage légers ou à une utilisation manuelle. Leur légèreté réduit la fatigue de l'opérateur et leur inertie modérée assure un rivetage précis. La variante molybdène-cuivre offre une meilleure conductivité thermique, permettant une dissipation rapide de la chaleur et une faible élévation de température en fonctionnement continu. La catégorie basse densité comprend également des pseudo-alliages tungstène-cuivre, où la phase cuivre améliore continuellement la conductivité. Ces mandrins ne présentent aucune interférence magnétique lors de l'assemblage électronique. En production, la poudre de mandrin basse densité est plus facile à mélanger, offre une plage de températures de frittage plus large et simplifie le contrôle du processus.

Les mandrins à riveter en alliage de tungstène à faible densité sont désormais utilisés dans l'outillage portatif et les postes de travail légers des lignes automatisées. Leur légèreté facilite leur manipulation lors des changements fréquents de mandrins. Différents traitements de surface sont disponibles, le plaquage chimique améliorant l'aspect et la résistance à la corrosion. Ces caractéristiques des mandrins à faible densité résultent de l'optimisation du matériau par ajustement de sa composition, offrant une solution légère pour le rivetage des supports et devenant progressivement un outil pratique pour des applications spécifiques. Avec la tendance à l'assemblage léger, le champ d'application de cette catégorie s'élargit également, apportant une valeur ajoutée aux processus d'assemblage.

2.1.3 Tige supérieure de rivet en alliage de tungstène dopé aux terres rares

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène dopé aux terres rares constituent une catégorie particulière optimisée par l'ajout de traces d'éléments de terres rares tels que le lanthane. L'yttrium ou le cérium sont utilisés dans ces mandrins pour affiner la microstructure des alliages de tungstène traditionnels, améliorant ainsi leur stabilité à haute température et leur résistance à la fatigue. Le dopage aux terres rares est généralement effectué sous forme d'oxydes ajoutés à la poudre et dispersés dans la phase liante ou à l'interface lors du frittage. Chimiquement, les terres rares captent les impuretés d'oxygène et de soufre, formant des composés stables et purifiant les joints de grains afin de réduire les sources de fragilité.

Les mandrins dopés aux terres rares présentent principalement des propriétés d'affinage du grain et de renforcement des interfaces. Le blocage des joints de grains par les terres rares freine la migration, augmente la température de recristallisation et maintient une microstructure fine après travail à chaud, ce qui confère au mandrin une résistance et une durabilité élevées. Les particules de tungstène sont mieux sphéroïdisées et la phase liante est uniformément encapsulée, ce qui permet une distribution des contraintes plus équilibrée lors d'un impact. Les propriétés de surface sont améliorées : l'agglomération des terres rares forme une fine couche protectrice, renforçant ainsi la résistance à l'oxydation du mandrin.

Ce type de mandrin convient aux applications de rivetage à haute température ou de longue durée. Il ne s'use pas sous l'effet de l'échauffement par friction localisée et sa dureté diminue lentement. Le dopage aux terres rares améliore également sa résistance à la fatigue ; la propagation des microfissures est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ralentie sous des impacts répétés, ce qui prolonge la durée de vie du mandrin. Lors de la mise en œuvre, le mandrin dopé présente une meilleure aptitude au formage à froid et est moins sujet à l'écaillage des bords. Il possède également une grande stabilité chimique, les terres rares inhibant l'amorçage de la corrosion.

Les mandrins de rivetage en alliage de tungstène dopé aux terres rares nécessitent un contrôle rigoureux de l'uniformité du dopage, obtenu par broyage à billes ou séchage par atomisation. Le traitement thermique active le mécanisme de dopage, et la précipitation liée au vieillissement renforce la phase de terres rares. Ces propriétés des mandrins dopés aux terres rares découlent du principe de microalliage, un concept fondamental de la science des matériaux. Elles permettent d'améliorer les performances des outils de rivetage et s'imposent progressivement comme la solution de choix pour les applications exigeantes. À mesure que la recherche progresse, cette méthode de dopage se perfectionne, contribuant ainsi à l'élargissement potentiel des fonctionnalités des mandrins.

2.2 Classification des barres supérieures de rivets en alliage de tungstène selon leur application

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène sont classés principalement selon leur application et leurs conditions de travail, reflétant leur adaptabilité variable aux différents environnements de rivetage. En usinage, la résistance aux chocs et la durée de vie sont privilégiées, tandis que pour les instruments de précision, la précision et la stabilité sont essentielles. La classification repose sur la dureté, la densité et les propriétés de surface du mandrin. Les mandrins d'usinage présentent une teneur élevée en tungstène pour résister à l'usure, tandis que les mandrins pour instruments de précision possèdent une microstructure uniforme afin de prévenir les microdéformations.

La classification tient également compte du matériau du rivet et du type d'équipement ; les rivets en alliage d'aluminium sont utilisés avec des mandrins à faible dureté, tandis que les rivets en acier requièrent des mandrins à haute résistance. En production, cette classification oriente la conception des faces d'extrémité et le traitement des surfaces de travail ; dans les applications mécaniques, les surfaces concaves absorbent les déformations, tandis que dans les applications de précision, les surfaces planes assurent un support temporaire. Le système de classification évolue avec les technologies d'assemblage, intégrant des éléments compatibles avec l'automatisation. La classification des mandrins en alliage de tungstène, basée sur l'application, offre un cadre pratique de sélection, favorise l'optimisation des processus de rivetage par l'adéquation au domaine et joue un rôle dans l'assemblage industriel.

2.2.1 Outils de pose de rivets en alliage de tungstène utilisés en usinage

Dans l'industrie de l'usinage, les mandrins à rivets en alliage de tungstène sont des outils spécialement conçus pour le rivetage haute résistance. Ces mandrins servent de support inverse dans les machines-outils ou les riveteuses manuelles, résistant aux chocs importants et assurant une fixation solide des rivets sur la tôle. Le mandrin présente un grand diamètre et une surface de travail plane ou légèrement concave pour faciliter l'expansion de la queue du rivet, tandis que ses faces lisses réduisent le frottement de l'équipement. La dureté élevée de l'alliage de tungstène permet au mandrin de résister aux indentations

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

répétées des rivets en acier ou en aluminium, et son usure de surface est lente, ce qui le rend adapté aux environnements de production en série.

En usinage, ces broches d'éjection sont couramment utilisées pour le rivetage de carrosseries automobiles, de composants navals ou de structures métalliques. Le squelette en particules de tungstène assure la rigidité, tandis que la phase de liaison absorbe les vibrations et prévient l'écaillage des bords. La forme de la face d'extrémité est adaptée au type de rivet : une tête plate permet le rivetage aveugle, tandis qu'une tête concave facilite le rivetage autoperforant. La broche d'éjection est fixée à une riveteuse pneumatique ; sous haute pression, la force de réaction inertielle est concentrée, ce qui garantit une déformation uniforme du rivet. Elle présente une grande stabilité chimique, résiste à la contamination par les liquides de refroidissement ou les huiles et peut être nettoyée pour retrouver sa surface lisse.

Dans le domaine de l'usinage, on utilise des mandrins de longueur ajustable ; les mandrins courts sont utilisés manuellement, tandis que les mandrins longs sont utilisés sur les lignes automatisées. Après traitement thermique, la microstructure devient fibreuse, ce qui confère une résistance axiale élevée et une bonne résistance à la flexion sous l'effet des forces latérales. Un traitement de surface brossé augmente l'adhérence et facilite le remplacement. L'utilisation de mandrins en alliage de tungstène dans ce domaine améliore l'efficacité du rivetage, réduit les temps d'arrêt pour maintenance et garantit une qualité d'assemblage constante. Les systèmes tungstène-nickel-fer haute densité sont couramment utilisés en production, avec un positionnement assisté magnétiquement. Ces caractéristiques d'adaptabilité résultent de la combinaison des matériaux et des procédés, offrant un support fiable pour l'assemblage mécanique. La maintenance de ces mandrins comprend une inspection périodique des irrégularités de la surface de travail et un polissage pour restaurer sa planéité. La résistance à la fatigue des alliages de tungstène assure des performances stables lors du rivetage à haute fréquence, ce qui permet d'obtenir des têtes de rivets esthétiques. Les applications s'étendent à la maintenance des machines lourdes, où les mandrins résistent à l'impact des rivets de grand diamètre sans se déformer. Le positionnement des mandrins à rivets en alliage de tungstène dans le domaine de l'usinage reflète la valeur technique de la durabilité des outils, optimisant les processus de connexion grâce au support des chocs et contribuant à des améliorations pratiques de la production industrielle.

2.2.2 Barres supérieures de rivets en alliage de tungstène pour instruments de précision

Dans le domaine des instruments de précision, les mandrins à riveter en alliage de tungstène sont des outils spécialisés pour le rivetage miniature ou de haute précision. Ces mandrins, de petit diamètre et dotés d'une surface de travail parfaitement lisse, servent de support pour garantir une déformation précise et sans dommage du rivet sur les petites pièces. Le corps du mandrin est court et précis, avec une face d'extrémité plane pour éviter les rayures sur les surfaces de précision et des côtés polis pour réduire la résistance à l'utilisation. La structure uniforme de l'alliage de tungstène assure une densité constante dans le mandrin, une force de réaction stable à l'impact et une forme symétrique de la tête du rivet.

Dans le domaine des instruments de précision, ces mandrins servent au rivetage de composants électroniques, médicaux ou optiques. La fine distribution des particules de tungstène garantit une liaison homogène et une déformation minimale, prévenant ainsi la formation de piqûres sur la surface de travail.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La conception de la face d'extrémité assure une planéité optimale, garantissant une répartition uniforme de la pression lors du support de micro-rivets. Chimiquement inerte, le mandrin résiste aux environnements de salles blanches, empêchant la libération de particules et la contamination des composants. Montés sur des riveteuses de précision manuelles ou électriques, ils nécessitent une faible force d'actionnement et leur inertie modérée permet un contrôle précis de la déformation. Dans ce domaine, la longueur du mandrin est cruciale ; les mandrins plus courts facilitent le travail dans les espaces restreints. Le traitement thermique affine la taille des grains, rendant le mandrin résistant à la micro-fatigue et lui permettant de conserver sa forme dans le temps. Le traitement de surface par électrodéposition ou passivation améliore la compatibilité, garantissant l'absence de réaction du mandrin avec les matériaux de l'instrument. L'utilisation de mandrins en alliage de tungstène dans ce domaine garantit la précision du rivetage, prévient le desserrage des fixations et assure un fonctionnement stable de l'instrument. Lors de sa fabrication, le système tungstène-nickel-cuivre est amagnétique, ce qui le rend idéal pour l'assemblage électronique. La faible dilatation thermique de l'alliage de tungstène assure une stabilité dimensionnelle sous l'effet des variations de température, garantissant ainsi un positionnement précis des rivets. Ses applications s'étendent aux instruments aérospatiaux et aux équipements de laboratoire, la conception miniature du mandrin permettant de s'adapter aux contraintes d'espace. Le positionnement des mandrins à rivets en alliage de tungstène dans les instruments de précision témoigne de la qualité de l'outillage et de la finesse du matériau, optimisant les assemblages de petite taille grâce à un support précis et jouant un rôle essentiel dans l'assemblage de haute technologie.

2.2.3 Barre supérieure de rivet en alliage de tungstène pour environnements à haute température

Les mandrins à riveter en alliage de tungstène, conçus spécifiquement pour les environnements à haute température, sont des outils optimisés pour le travail à chaud ou le rivetage à haute température. Ces mandrins doivent résister aux températures élevées localisées et aux cycles thermiques lors du rivetage, tout en conservant leur stabilité dimensionnelle et la précision de leur support. Leur conception privilégie la stabilité thermique, avec une teneur élevée en tungstène pour un meilleur maintien du point de fusion. Une phase liante résistante à la chaleur est sélectionnée, ce qui permet d'obtenir une microstructure dense après frittage et de réduire le risque de ramollissement thermique. La surface de travail, plane ou légèrement concave, subit un traitement thermique spécifique pour former une couche résistante aux hautes températures qui limite la génération de chaleur par frottement.

En rivetage à haute température, ce type de mandrin est utilisé pour le rivetage à chaud ou l'assemblage de métaux à chaud. La structure en particules de tungstène assure sa rigidité à haute température, tandis que les phases de cuivre ou de nickel régulent la dilatation thermique, évitant ainsi toute déformation ou fissuration. La conception de l'extrémité favorise la conduction thermique, permettant une dissipation rapide de la chaleur et limitant son accumulation, ce qui se traduit par une faible élévation de température lors d'une utilisation continue. Ce mandrin présente une excellente stabilité chimique ; sa surface forme une couche anti-oxydante, naturelle ou obtenue par passivation, le protégeant de la corrosion par les gaz à haute température. Sa longueur modérée facilite son utilisation avec des équipements haute température, et son extrémité fixe est compatible avec les matériaux réfractaires.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le traitement des mandrins destinés aux environnements à haute température comprend un recuit à haute température qui affine le grain et améliore ainsi leur résistance à la fatigue thermique. Ces mandrins présentent une propagation lente des microfissures sous l'effet de chocs thermiques répétés. Les revêtements de surface ou le renforcement par dispersion améliorent encore leur résistance à la chaleur, garantissant leur stabilité dans les fluides à haute température tels que les huiles ou les gaz. L'utilisation de mandrins en alliage de tungstène dans ce domaine contribue à la fiabilité des assemblages par soudage à chaud, assurant une formation uniforme des rivets et une qualité d'assemblage constante.

L'inspection de ces mandrins à riveter, réalisée après refroidissement et polissage pour obtenir une finition lisse, est essentielle pour détecter toute oxydation superficielle. La version haute densité présente une forte inertie, garantissant un transfert d'énergie efficace lors du rivetage à chaud. La gamme de mandrins à riveter en alliage de tungstène, conçue spécifiquement pour les hautes températures, illustre l'adaptabilité technique de ce matériau résistant à la chaleur. Elle assure un support stable lors de l'assemblage à chaud et s'impose progressivement comme une solution de choix pour le rivetage à haute température. Grâce aux progrès des techniques de travail à chaud, l'application de ces mandrins se développe, apportant une résistance thermique précieuse aux procédés d'assemblage.

2.2.4 Barre supérieure de rivet en alliage de tungstène pour environnements d'usure

Les mandrins à riveter en alliage de tungstène pour environnements abrasifs sont des outils renforcés conçus pour les conditions de frottement élevé ou d'impact abrasif. Ces mandrins résistent à l'usure de surface et conservent une surface de travail lisse, garantissant ainsi la précision lors du rivetage de matériaux durs ou d'opérations à haute fréquence. Le corps du mandrin présente une dureté élevée, renforcée par des particules de tungstène dispersées ou durcies en surface, tandis que la phase de liant assure un équilibre de ténacité optimal pour prévenir l'écaillage. La surface de travail est polie miroir ou microtexturée afin de réduire l'adhérence des rivets et l'incrustation d'abrasifs. En environnements abrasifs, ces mandrins sont utilisés pour le rivetage de l'acier inoxydable, des alliages de titane ou des matériaux composites. La phase de tungstène résiste aux rayures abrasives et la formation de piquûres de surface est lente. La conception à face d'extrémité plate permet l'utilisation de rivets de grande surface, et le revêtement anti-usure latéral réduit le frottement de l'équipement. Grâce à sa bonne stabilité chimique, le mandrin résiste à l'abrasion par le liquide de refroidissement et sa surface est moins sujette aux rainures d'usure. Sa longueur est ajustable en fonction de l'équipement et son extrémité fixe est renforcée pour éviter tout desserrage.

Les mandrins spécialement conçus pour les environnements abrasifs bénéficient d'un traitement de surface par implantation ionique ou par revêtement en carbure, ce qui améliore la résistance à l'usure grâce à un gradient de dureté et prolonge leur durée de vie lors du rivetage haute fréquence. Le traitement thermique affine la taille des grains, optimisant ainsi la résistance à la fatigue et à l'usure. L'utilisation de mandrins en alliage de tungstène dans ce domaine accroît la durabilité, et la forme constante de la tête de rivet réduit la fréquence de remplacement.

Ces outils de rivetage nécessitent un contrôle régulier de la rugosité de surface, un polissage ou une retouche de revêtement. Le système tungstène-nickel-fer offre une dureté élevée, le rendant adapté aux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

applications à forte usure. La catégorie spécifique des outils de rivetage en alliage de tungstène résistant à l'usure témoigne de l'optimisation technique de la conception du matériau, assurant un support fiable dans des conditions de frottement extrêmes et s'imposant progressivement comme un outil courant pour le rivetage haute durabilité.

2.3 Analyse des différences de performance des différents types de tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

Les différents types de mandrins à rivets en alliage de tungstène sont principalement classés selon leur composition, leur application et leurs variations structurelles. Cette analyse permet de comprendre les performances optimales des différentes catégories de supports de rivetage. Les mandrins haute densité présentent une densité élevée et une forte inertie, ce qui les rend adaptés aux chocs importants. Leur transfert d'énergie est concentré et la déformation du rivet est uniforme. Les mandrins basse densité sont légers, faciles à manipuler, adaptés aux équipements légers et offrent de faibles vibrations ainsi qu'une bonne précision de contrôle.

Les aciers dopés aux terres rares présentent une microstructure affinée, une meilleure résistance à la fatigue et à la chaleur, ce qui réduit les micro-dommages subis par la broche d'éjection lors des cycles thermiques ou d'une utilisation prolongée. Les aciers conçus spécifiquement pour l'usinage offrent une dureté élevée, une résistance à l'usure et une longue durée de vie de la surface de travail de la broche d'éjection. Les aciers conçus spécifiquement pour les instruments de précision présentent une bonne uniformité, une micro-déformation minimale et une grande précision de support de la broche d'éjection. Les aciers conçus spécifiquement pour les hautes températures présentent des températures de ramollissement élevées, des formes stables et des performances stables sous choc thermique. Les aciers conçus spécifiquement pour la résistance à l'usure se caractérisent par un renforcement de surface, une forte résistance aux rayures et une grande durabilité dans les environnements de frottement.

Les différences de performance se reflètent également dans l'usinabilité et la maintenance ; les alliages haute densité nécessitent un traitement thermique, tandis que les alliages basse densité sont plus faciles à travailler à froid. Les alliages dopés aux terres rares présentent une bonne aptitude au recuit et requièrent des traitements de surface mécaniques plus spécifiques. Cette analyse comparative oriente le choix : les alliages haute densité sont destinés aux applications exigeantes, les alliages basse densité aux applications légères et les alliages aux terres rares aux applications à haute température et aux environnements à forte usure. L'analyse comparative des performances des mandrins en alliage de tungstène met en évidence l'importance de la classification en science des matériaux, permettant d'adapter les outils aux applications spécifiques et offrant un large éventail de choix pour le rivetage.

2.3.1 Effet de la variation de composition sur les propriétés physiques des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

influent principalement sur leurs propriétés physiques, notamment la densité, la stabilité thermique et l'état de surface, offrant ainsi diverses options de performance pour différentes applications. L'augmentation de la teneur en tungstène accroît la densité globale du mandrin, ce qui se traduit par une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

distribution de masse plus concentrée. Il en résulte une force de réaction inertielle plus stable lors de l'impact du rivetage, conduisant à une déformation plus uniforme à l'extrémité du rivet. La proportion de la phase de liaison influe sur le comportement de dilatation thermique. Lorsque le système nickel-fer est prédominant, le mandrin présente une excellente stabilité dimensionnelle sous différentes conditions de température. Le passage à un système nickel-cuivre améliore la conductivité thermique, permettant une dissipation plus rapide de la chaleur de frottement localisée et réduisant l'élévation de température à la surface de travail.

Les modifications de composition influent également sur la mouillabilité de surface et la stabilité chimique. Une teneur accrue en cuivre facilite la formation d'une couche protectrice uniforme à la surface du mandrin, le protégeant ainsi de la corrosion par les huiles d'atelier ou les produits de nettoyage. L'ajout de fer, quant à lui, contribue à la formation d'un film d'oxyde dense, améliorant la résistance à la corrosion atmosphérique. Un dopage à l'état de traces avec des terres rares purifie les joints de grains du mandrin, améliorant sa stabilité structurelle sous cyclage thermique et réduisant le risque de microfissures en surface. Les ajustements de composition influent également sur la distribution des contraintes résiduelles après usinage ; un rapport nickel-cuivre approprié permet de réduire les contraintes internes, assurant ainsi une meilleure stabilité dimensionnelle du mandrin lors d'utilisations répétées. En production, les variations de composition sont obtenues par le dosage des poudres et les paramètres de frittage. L'adéquation de la granulométrie de la poudre de tungstène à celle de la poudre de liant affine encore l'impact sur les performances. Dans des conditions de rivetage identiques, les mandrins de compositions différentes présentent un transfert d'énergie plus concentré pour les modèles à haute densité, un meilleur contrôle de l'échauffement pour les modèles à conductivité thermique élevée et des cycles de maintenance plus longs pour les modèles à forte résistance à la corrosion. L'influence des variations de composition sur les propriétés physiques des mandrins à rivets en alliage de tungstène offre une grande flexibilité dans le choix des outils. Un dosage approprié répond à diverses exigences telles que l'usinage, l'assemblage de précision et les environnements à haute température, démontrant ainsi une grande adaptabilité dans la pratique du rivetage.

2.3.2 Conception axée sur l'application reflétée dans les mandrins à rivets en alliage de tungstène

La conception des mandrins à rivets en alliage de tungstène, axée sur l'application, se traduit principalement par une optimisation ciblée de leurs dimensions, de la forme de leur surface de travail et de leur traitement de surface. Cette approche permet au mandrin de mieux s'adapter aux conditions de rivetage spécifiques, améliorant ainsi l'efficacité opérationnelle et la qualité de l'assemblage. Les mandrins utilisés en usinage présentent souvent des diamètres plus importants et des extrémités concaves pour compenser la forte déformation de la queue du rivet haute résistance. Leur longueur modérée facilite la fixation à l'aide d'une riveteuse pneumatique, tandis que les textures antidérapantes latérales simplifient le réglage manuel. Dans le domaine de l'instrumentation de précision, un mandrin fin et une surface de travail plane sont privilégiés pour garantir un support précis des rivets miniatures, avec une surface polie miroir pour éviter de rayer les composants sensibles. Les mandrins destinés aux environnements à haute température sont conçus pour une dissipation thermique optimale. De légères rainures sur la surface de travail favorisent la circulation de l'air, le corps du mandrin est constitué d'une phase de liaison résistante à la chaleur et les extrémités sont revêtues d'une couche thermo-isolante afin

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de réduire le transfert de chaleur vers l'équipement. Les mandrins spécifiques aux environnements abrasifs présentent une surface de travail trempée ou micro-texturée afin d'accroître l'épaisseur de la couche résistante à l'usure, ainsi que des extrémités fixes renforcées pour résister aux impacts à haute fréquence. La conception, axée sur l'application, s'étend jusqu'au mode de fixation : certains mandrins sont dotés d'interfaces à verrouillage rapide ou filetées pour une intégration aisée aux équipements automatisés. Le traitement de surface reflète également l'orientation de l'application. Les mandrins d'usinage utilisent souvent des revêtements résistants à l'huile, tandis que les mandrins pour instruments de précision optent pour des revêtements brillants qui empêchent le détachement de particules. Les mandrins haute température sont en outre revêtus d'un traitement anti-oxydation. Le rapport longueur/diamètre est adapté aux spécifications du rivet : les mandrins courts et épais conviennent aux charges importantes, tandis que les mandrins longs et fins sont plus adaptés aux espaces confinés. Cette conception orientée application des mandrins à rivets en alliage de tungstène transforme l'outil d'un outil polyvalent en un outil spécialisé. Grâce à la coordination de la structure et du traitement, l'adaptabilité des procédés de rivetage est améliorée, ce qui leur confère une utilité pratique dans divers contextes industriels.

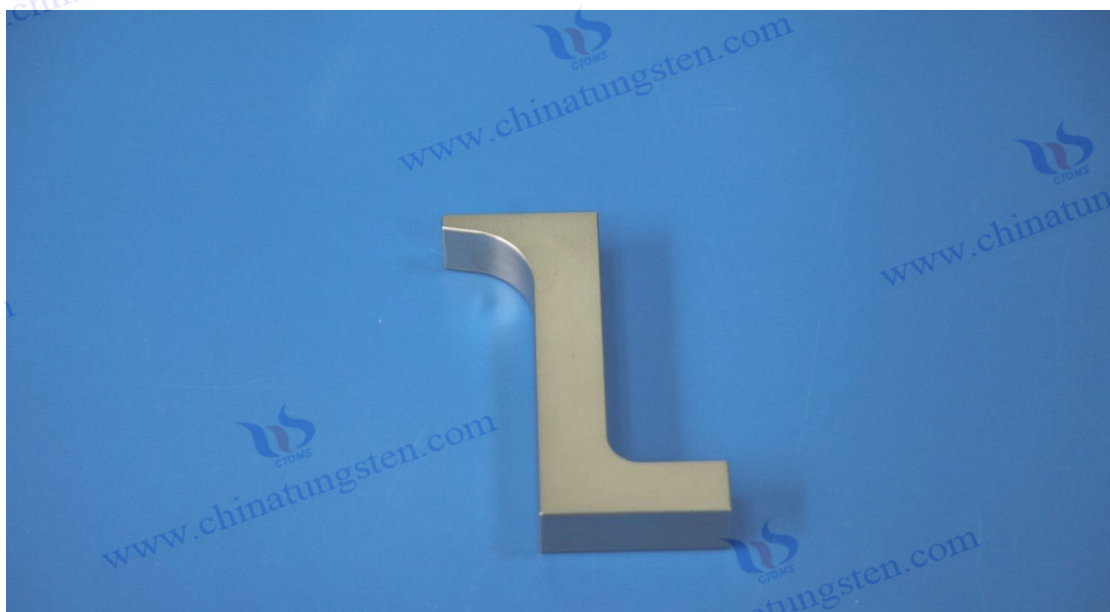
2.3.3 Effet des différences microstructurales sur les propriétés mécaniques des mandrins de rivets en alliage de tungstène

Les différences microstructurales des mandrins de rivets en alliage de tungstène influencent principalement leurs propriétés mécaniques via la taille des particules de tungstène, la distribution de la phase liante et l'adhérence interfaciale. Ce contrôle microstructural détermine la résistance, la ténacité et la tenue à la fatigue du mandrin sous charges d'impact. Les mandrins haute densité présentent des particules de tungstène plus fines et plus uniformément réparties, avec une fine couche de phase liante formant un squelette dense. Il en résulte une meilleure dispersion des contraintes lors de l'impact, réduisant ainsi le risque d'indentations superficielles ou de microfissures. À l'inverse, les mandrins basse densité possèdent un espacement plus important entre les particules de tungstène, un réseau de phase liante plus continu et une meilleure coordination de la déformation, ce qui conduit à une absorption d'énergie plus douce sous faibles charges ou en présence de vibrations.

Les mandrins dopés aux terres rares se caractérisent par la purification des joints de grains et le renforcement par phase dispersée. Les composés de terres rares fixent les joints de grains, empêchant le glissement et améliorant ainsi la résistance du mandrin à la fatigue à haute température, ce qui ralentit la dégradation de sa résistance après des cycles thermiques. Les mandrins spécifiques à l'usinage utilisent un durcissement superficiel pour former une structure à gradient, avec des particules de tungstène enrichies en surface qui améliorent la résistance à l'usure, tandis que la phase liante au cœur maintient la ténacité et empêche l'écaillage fragile des bords. Les mandrins spécifiques aux instruments de précision présentent une sphéroïdisation élevée des particules, des interfaces propres exemptes d'agglomération d'impuretés, une concentration de contraintes minimale sous de faibles impacts et une excellente stabilité de forme. La texture fibreuse induite par le travail à chaud est également une méthode de contrôle. L'allongement des grains dans le sens du laminage améliore la résistance axiale, ce qui réduit la tendance à la flexion du mandrin sous l'effet de forces latérales. Le recuit affine les grains recristallisés, équilibrant dureté et plasticité, et le mandrin présente une bonne récupération de ses performances après des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

utilisations répétées. Les différences microstructurales, qui permettent de contrôler les propriétés mécaniques des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, offrent des performances variables selon les applications. L'optimisation microstructurale assure un équilibre optimal entre résistance et ténacité, garantissant une réponse mécanique stable des supports de rivetage. Grâce aux progrès des techniques d'observation, cette méthode de contrôle est constamment améliorée, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour optimiser les performances des mandrins.



Tige supérieure de rivet en alliage de tungstène CTIA GROUP LTD

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

Chapitre 3 Procédé de fabrication des tiges de rivet en alliage de tungstène

3.1 Méthode métallurgique pour les tiges de rivets en alliage de tungstène

La fabrication de mandrins à rivets en alliage de tungstène repose sur une chaîne de production complète, depuis les matières premières en poudre jusqu'aux outils finis. Ce procédé permet d'obtenir un composite de tungstène et d'éléments auxiliaires par mélange, formage, frittage et post-traitement, afin de former des produits en forme de tige adaptés au support de rivetage. Le choix de la poudre est fondamental. Une poudre de tungstène de haute pureté et des poudres de liant, telles que le nickel-fer ou le nickel-cuivre, sont mélangées dans des proportions spécifiques. La finesse des particules de la poudre de tungstène améliore la densité, tandis que la forte réactivité du liant favorise le mouillage. Lors du mélange, un broyage mécanique à billes ou un broyeur en V assure une distribution homogène. Des tensioactifs sont utilisés pour prévenir l'agglomération et garantir l'homogénéité macroscopique des éléments.

Le procédé de formage consiste à presser un mélange de poudres pour obtenir des ébauches en forme de barres. Le pressage isostatique à froid est couramment utilisé pour les ébauches de grandes barres. Le fluide de pressage transmet la pression de manière isotrope, ce qui garantit une densité uniforme de l'ébauche et évite les gradients de contrainte. Le moulage par compression convient aux petites séries ; il utilise un moule en acier avec une pression unidirectionnelle et un lubrifiant pour réduire le frottement. Après formage, la résistance de l'ébauche crue est renforcée par un liant temporaire, facilitant ainsi sa manipulation.

Le frittage est l'étape clé du procédé. Le chauffage sous vide ou sous atmosphère d'hydrogène provoque la fusion de la phase liante et son imprégnation des particules de tungstène lors de l'apparition d'une phase liquide, induisant un réarrangement et une densification. Le contrôle précis de la température permet un écoulement optimal de la phase liquide, évitant ainsi l'affaissement ou la ségrégation. La phase de maintien implique un mécanisme de dissolution-reprécipitation qui sphéroïde les particules, assurant une liaison interfaciale nette. Un refroidissement lent stabilise la microstructure, prévenant la fissuration sous contrainte thermique. Le pressage isostatique à chaud favorise le frittage, refermant les pores et augmentant la densité de la billette.

Le travail à chaud déforme la billette frittée, par étirage ou laminage pour réduire son diamètre, par forgeage multidirectionnel pour créer une microstructure uniforme, et par recuit intermédiaire pour éliminer la dureté et restaurer la plasticité. La face d'extrémité du mandrin est usinée et rectifiée pour obtenir une surface lisse. Le traitement thermique de mise en solution et de vieillissement provoque la précipitation de phases, renforçant le mandrin pour atteindre un équilibre entre résistance et ténacité.

Le traitement de surface comprend un nettoyage chimique pour éliminer l'oxydation, un polissage pour améliorer la planéité et un revêtement pour renforcer la résistance à la corrosion. La finition consiste en un découpage à une longueur fixe et un contrôle de la densité dimensionnelle. La flexibilité du procédé de métallurgie des poudres permet d'ajuster les paramètres en fonction des spécifications du mandrin ; les poudres haute densité nécessitent un temps de frittage plus long, tandis que les poudres basse densité augmentent la proportion de liant. Ce procédé est économique et les poudres résiduelles sont recyclables.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'application de la métallurgie des poudres aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène illustre l'ingénierie des matériaux, de la composition microscopique au formage macroscopique. L'optimisation de la chaîne de production améliore la durabilité de l'outil et assure une base stable pour le rivetage. Grâce aux progrès technologiques, cette méthode intègre également des éléments d'automatisation, contribuant ainsi à l'efficacité de la production de mandrins.

3.1.1 Étapes de préparation des matières premières pour la fabrication de mandrins à rivets en alliage de tungstène

L'étape de préparation des matières premières dans la fabrication des mandrins à rivets en alliage de tungstène est le point de départ du procédé de métallurgie des poudres. Cette étape, par la purification de la poudre de tungstène, le contrôle de la granulométrie et le mélange des éléments d'alliage, garantit l'uniformité de la microstructure et la constance des performances lors des opérations de formage et de frittage ultérieures. La préparation des matières premières met l'accent sur l'adéquation entre la pureté chimique et les propriétés physiques. La poudre de tungstène, composant principal, doit être d'une grande pureté afin d'éviter les défauts induits par les impuretés, tandis que les poudres d'éléments d'alliage à forte réactivité favorisent le mouillage. Le procédé débute par la réduction du tungstate d'ammonium, suivie du tamisage et du mélange des poudres. Chimiquement, la réaction de réduction élimine l'oxygène et le mélange assure une distribution aléatoire des éléments.

Le procédé de préparation comprend la préparation de la poudre de tungstène, la sélection des poudres auxiliaires et l'homogénéisation. La granulométrie de la poudre de tungstène est contrôlée par réduction à l'hydrogène, tandis que les poudres d'alliages comme le nickel, le fer et le cuivre sont préparées par carbonylation ou atomisation. Avant le mélange, la poudre est séchée pour éviter l'absorption d'humidité, et un nettoyage chimique élimine les contaminants de surface. La rigueur des étapes de préparation garantit une composition maîtrisable du mandrin, assurant ainsi une base stable pour la densité et la dureté. La qualité des matières premières influe directement sur la résistance aux chocs du mandrin, et la purification réduit les risques de fragilité. La flexibilité de la préparation des matières premières permet des ajustements selon le type de mandrin : les mandrins haute densité utilisent une poudre de tungstène fine et pure, tandis que les mandrins basse densité incorporent un liant. La poudre est stockée dans un endroit sec pour éviter l'oxydation et l'agglomération. Les étapes de préparation des matières premières pour la production de mandrins à rivets en alliage de tungstène illustrent la gestion technique des matériaux de base. Elles garantissent le bon déroulement de la chaîne de production grâce à la purification et au mélange, et établissent une base matérielle fiable pour la fabrication des mandrins. Avec les progrès technologiques, cette préparation intègre également le pesage et le contrôle automatisés, ce qui améliore l'efficacité et la régularité.

3.1.1.1 Purification et contrôle de la granulométrie de la poudre de tungstène

Les aspects essentiels de la préparation des matières premières pour les mandrins de rivets en alliage de tungstène sont les suivants : ce contrôle permet d'obtenir une poudre de tungstène de haute pureté et une distribution granulométrique optimale grâce à une réduction et un tamisage en plusieurs étapes, garantissant un frittage dense et une microstructure uniforme du mandrin. La purification débute par la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

recristallisation du tungstate d'ammonium afin d'éliminer les métaux alcalins ainsi que les impuretés de phosphore et de soufre. Après calcination en oxydes, une réduction par l'hydrogène se produit : l'hydrogène réagit avec les oxydes pour former de l'eau, qui est ensuite évacuée. Le contrôle du point de rosée assure l'élimination rapide de l'humidité, empêchant ainsi la réoxydation de la poudre de tungstène. Une réduction par étapes à basse température élimine l'eau de cristallisation, tandis que les hautes températures forment le tungstène métallique. Ce processus est répété pour améliorer la pureté.

Le contrôle de la granulométrie se reflète dans les paramètres de réduction. Une température élevée et une vitesse de brassage rapide produisent une poudre grossière, tandis qu'une température basse et une vitesse lente produisent une poudre fine. Chimiquement, la cinétique de réduction influe sur la croissance des germes cristallins, et l'ajustement de la concentration en humidité empêche un grossissement anormal. La distribution granulométrique est contrôlée par un granulomètre laser ou par la méthode de Fisher. Une poudre fine favorise le frittage, tandis qu'une poudre grossière renforce la structure. Les particules anormales sont éliminées par tamisage ou par classification pneumatique. Les barres supérieures haute densité nécessitent une poudre fine et uniforme, tandis que les barres supérieures basse densité tolèrent une distribution légèrement plus large.

L'association de la purification et du contrôle permet d'obtenir une poudre de tungstène à la surface propre, à faible teneur en oxygène et en carbone, avec des inclusions fragiles réduites et une meilleure résistance aux chocs du mandrin. Le nettoyage chimique et le lavage à l'acide éliminent les résidus, suivis d'un séchage et d'un stockage sous atmosphère inerte. La purification et le contrôle granulométrique de la poudre de tungstène témoignent du perfectionnement de la conception des matières premières, tandis que le tamisage réducteur garantit la formation fiable de la structure du mandrin, un élément fondamental dans la production d'outils de rivetage. Grâce aux progrès des techniques de contrôle, ce processus est continuellement affiné, permettant ainsi l'optimisation des propriétés du matériau.

3.1.1.2 Homogénéité des éléments d'alliage

L'homogénéité des éléments d'alliage est une étape cruciale dans la préparation des matières premières pour mandrins de rivets en alliage de tungstène. Cette homogénéité est obtenue par mélange mécanique ou broyage à billes afin de garantir une distribution aléatoire des éléments et d'éviter que la ségrégation au frittage n'affecte la régularité des performances du mandrin. Avant le mélange, les poudres d'alliage telles que le nickel, le fer et le cuivre subissent un prétraitement pour éliminer la couche d'oxyde par réduction et pour améliorer chimiquement l'activité de surface et favoriser l'adhérence. Un mélangeur en V ou à double cône est utilisé à basse vitesse pour éviter la séparation des particules, et un temps de mélange prolongé garantit une homogénéité macroscopique.

Le broyage à billes affine la poudre par mélange à haute énergie et pré-alliage, induisant une diffusion par forces chimiques et mécaniques et assurant une liaison interfaciale initiale. Une variante de séchage par atomisation atomise la suspension en une poudre composite sphérique, améliorant la fluidité et l'homogénéité. Après mélange, des échantillons sont prélevés pour analyse chimique ou microscopie électronique afin de vérifier la distribution ; une faible déviation élémentaire est considérée comme acceptable. L'homogénéité du mélange influe sur la distribution de densité du mandrin. Un mélange

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

homogène garantit un réarrangement homogène lors du frittage, réduit la phase liante localisée et équilibre la résistance et la ténacité du mandrin. Des additifs chimiques favorisent la dispersion, et le mélange est mélangé par voie humide avec de l'alcool, puis séché. Le contrôle de l'homogénéité du mélange assure la dispersion des contraintes lors de l'impact et une usure uniforme de la surface de travail. L'homogénéité du mélange des éléments d'alliage dans les mandrins à rivets en alliage de tungstène reflète la recherche d'homogénéité dans l'ingénierie des lots, garantissant la cohérence macroscopique de la microstructure grâce aux interactions physico-chimiques et posant les bases de la performance dans la fabrication d'outils. Grâce aux progrès réalisés dans le domaine des équipements de mélange, cette uniformité continue de s'améliorer, contribuant ainsi à des améliorations concrètes de la fiabilité des mandrins.

3.1.2 Effet du procédé de frittage sur la densité des mandrins de rivets en alliage de tungstène

L'influence du frittage sur la densité des mandrins de rivets en alliage de tungstène se manifeste principalement par la maîtrise de la température, de l'atmosphère et du temps de maintien. Cette influence détermine le degré de transformation du mandrin, d'une ébauche poreuse à un produit dense, affectant ainsi sa stabilité et sa durabilité lors des impacts de rivetage. Lors de la phase initiale de diffusion à l'état solide, les particules s'agglomèrent et la densité augmente lentement. Après le passage à la phase liquide, la phase liante fond et imprègne les particules de tungstène, et le réarrangement qui s'ensuit assure un tassement compact, augmentant significativement la densité. Des températures plus élevées augmentent la quantité de phase liquide, favorisant une meilleure diffusion et un remplissage plus complet des pores ; cependant, des températures excessivement élevées entraînent un débordement, provoquant une déformation ou une ségrégation de l'ébauche et une distribution de densité non homogène.

Le choix de l'atmosphère influe sur la densité ; la réduction par l'hydrogène élimine les inclusions d'oxyde, maintient la propreté de l'interface et favorise le mouillage et la densification ; le vide élimine les impuretés volatiles et réduit les résidus de cellules fermées. Un temps de maintien prolongé permet un réarrangement et une dissolution-reprécipitation suffisants, réduisant l'énergie de surface de sphéroïdisation des particules de tungstène et augmentant la densité de retrait des pores ; cependant, un temps de maintien excessif peut entraîner un grossissement des particules et l'apparition de nouveaux pores. Une vitesse de chauffage lente évite une liquéfaction locale prématurée, susceptible de créer des gradients de densité. Un refroidissement contrôlé prévient la fissuration par contrainte thermique, qui peut affecter l'homogénéité de la densité finale.

Les effets du frittage se répercutent sur les dimensions du mandrin. Lorsque le rapport longueur/diamètre de la billette en forme de barre est élevé, la densité finale tend à être faible, nécessitant des dispositifs de support pour garantir l'uniformité. Des procédés auxiliaires, tels que le pressage isostatique à chaud, appliquent une pression après frittage pour refermer les pores et accroître encore la densité. Avec une forte teneur en tungstène, la densité de frittage dépend davantage de l'optimisation de la phase liquide ; une phase liante plus faible requiert des temps de maintien plus longs. L'impact du frittage sur la densité des mandrins de rivetage en alliage de tungstène reflète le principe de densification de la métallurgie à haute température, influençant les propriétés volumétriques du mandrin par la coordination des paramètres et posant ainsi les bases mécaniques des outils de rivetage. Grâce aux progrès réalisés dans

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

le contrôle des procédés, la maîtrise de cet effet s'affine, offrant une garantie fiable de la constance de la densité du mandrin.

3.1.3 Optimisation de la technologie de formage par pression des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

L'optimisation du procédé de pressage des mandrins à rivets en alliage de tungstène vise principalement à améliorer la répartition de la pression, la conception de la matrice et la fluidité de la poudre. Cette optimisation garantit une densité à cru uniforme et une forme parfaite, assurant ainsi une base de haute qualité pour le frittage ultérieur. L'optimisation du pressage isostatique à froid exploite la transmission isotrope de la pression du fluide, ce qui permet d'obtenir un faible gradient de densité dans la billette. Les paramètres optimisés comprennent une vitesse de pressurisation lente et un temps de maintien prolongé afin d'éviter les fissures dues au rebond élastique. Le choix d'un matériau de matrice flexible adapté à la dureté de la poudre de tungstène réduit les dommages causés par le frottement.

L'optimisation du moulage repose sur une pressurisation bidirectionnelle, une structure de moule flottante pour équilibrer la densité des parties supérieure et inférieure, et une force de pressage adaptée au volume de poudre, avec une vitesse de pressage progressive afin d'éviter le délaminage. L'optimisation de la fluidité de la poudre inclut l'ajout de lubrifiant ; chimiquement, le stéarate de zinc réduit le frottement interparticulaire, ce qui permet un remplissage plus dense. L'optimisation comprend également une pré-pressurisation et une purge pour réduire les gaz résiduels. L'optimisation des préformes en forme de tige implique le contrôle du rapport longueur/diamètre et l'utilisation d'un mandrin de support pour éviter la flexion.

L'optimisation de la technologie de formage par presse influe sur la régularité des éjecteurs ; des ébauches crues à haute densité permettent de réduire le retrait au frittage et d'améliorer la précision dimensionnelle. Une poudre de tungstène fine optimise le compactage, tandis qu'une poudre plus grossière requiert une pression plus élevée. Les essais optimisés comprennent la mesure multipoints de la densité des ébauches crues afin de guider l'itération des paramètres. La gestion de la pureté chimique garantit un faible taux de résidus de lubrifiant, prévenant ainsi la contamination lors du frittage. L'optimisation de la technologie de formage par presse des éjecteurs de rivets en alliage de tungstène démontre la coordination de la pression dans le processus de formage, permettant une préparation fiable des ébauches grâce à l'amélioration des moules et des paramètres, et apportant une valeur ajoutée concrète à la production d'outillage. Avec le développement de la précision des presses, cette optimisation s'étend, offrant de nouvelles possibilités pour le formage des éjecteurs.

3.1.4 Effet du frittage en phase liquide sur la densification des mandrins de rivets en alliage de tungstène

Le frittage en phase liquide des mandrins à rivets en alliage de tungstène est principalement réalisé grâce aux mécanismes de mouillage, de réarrangement et de dissolution-reprécipitation consécutifs à la fusion de la phase liante. Ce procédé transforme le mandrin, initialement poreux sous forme de billette pressée, en un produit de haute densité, améliorant ainsi ses propriétés de support mécanique. Lors de l'apparition

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la phase liquide, la phase liante s'écoule et enrobe les particules de tungstène, réduisant la tension superficielle et induisant un réarrangement des particules pour combler les pores de grande taille, ce qui entraîne une augmentation rapide de la densité. Un faible angle de mouillage favorise la capillarité et, chimiquement, une diminution de l'énergie interfaciale accélère le processus.

Le mécanisme de dissolution-reprécipitation se met en place pendant la phase de maintien. Les petites particules de tungstène se dissolvent dans la phase liquide, tandis que les plus grosses précipitent à leur surface. La sphéroïdisation des particules réduit les contraintes aux angles vifs, et le rétrécissement des pores densifie davantage la structure. Ce mécanisme est optimal lorsque le volume de la phase liquide est modéré ; un débit excessif entraîne une déformation, tandis qu'un volume insuffisant provoque un réarrangement inadéquat. La plage de température contrôle le rapport de la phase liquide, et le temps de maintien permet au mécanisme de se développer pleinement. Une atmosphère protectrice empêche l'oxydation de perturber le mouillage, et la réduction par l'hydrogène assure une interface propre.

mandrins cylindriques . Les billettes longues, maintenues par des dispositifs de support, facilitent la distribution de la phase liquide, évitant ainsi les zones de faible densité aux extrémités. Lorsque la teneur en tungstène est élevée, l'efficacité dépend de l'optimisation de la phase liante ; dans les systèmes à base de cuivre, la température de la phase liquide est basse et facilement contrôlable. Une repressurisation ultérieure permet de combler les pores résiduels dans la phase liquide. L'effet de densification du frittage en phase liquide sur les mandrins de rivetage en alliage de tungstène illustre le principe métallurgique de la fluidité à haute température, assurant la stabilité volumique du mandrin par un mécanisme synergique et constituant ainsi une base solide pour les outils de rivetage. Grâce aux progrès réalisés dans le domaine des équipements de frittage, le contrôle de cet effet est de plus en plus précis, offrant une méthode fiable de densification des mandrins.

3.2 Technologie d'usinage des têtes de rivets en alliage de tungstène

L'usinage des mandrins à rivets en alliage de tungstène est une étape essentielle du post-traitement en métallurgie des poudres. Ce procédé transforme les billettes frittées en outils de précision en forme de barres par tournage, rectification, étirage et forgeage à chaud, optimisant ainsi la précision dimensionnelle, la qualité de surface et la microstructure. L'usinage compense les limitations de forme et la rugosité de surface des billettes frittées. La dureté élevée des alliages de tungstène impose l'utilisation d'outils de coupe durs et un refroidissement approprié lors de l'usinage. Ce procédé comprend le formage et la déformation plastique ; le formage permet d'obtenir une forme précise, tandis que la déformation plastique affine la microstructure et améliore la résistance.

La technologie d'usinage met l'accent sur la résistance à l'usure des outils et l'adéquation des paramètres de coupe. La phase dure des particules de tungstène facilite l'affûtage, tandis que la phase de liaison assure une coupe nette. Le liquide de refroidissement garantit la stabilité chimique et la protection contre la corrosion, et la coupe à sec ou une lubrification minimale réduit les dommages thermiques. La séquence d'usinage progresse de l'ébauche à la finition : tournage pour former la pièce, puis rectification pour obtenir une finition lisse. Le travail à chaud est combiné au travail à froid, avec forgeage à chaud pour le découpage initial suivi de rectification à froid pour la finition. Le contrôle des défauts se concentre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sur les fissures et les rayures superficielles, qui sont atténuées par relaxation des contraintes lors du recuit. La technologie d'usinage des mandrins à rivets en alliage de tungstène reflète les défis de formage des alliages réfractaires. L'outillage de précision est obtenu par l'optimisation des outils et des procédés, offrant une base dimensionnellement stable pour les supports de rivetage. L'utilisation de machines à commande numérique (CNC) permet d'améliorer encore la précision de cette technologie, contribuant ainsi à la diversification des fonctions des mandrins.

3.2.1 Application du formage aux mandrins de rivets en alliage de tungstène

La mise en forme des mandrins à rivets en alliage de tungstène s'effectue principalement par tournage, fraisage et rectification. Ce procédé permet de donner à la billette frittée une forme de tige précise, dotée de faces d'extrémité fonctionnelles, assurant un ajustement parfait entre le mandrin et la queue du rivet et un support stable. Le processus de mise en forme débute avec la billette frittée, suivie d'un tournage pour enlever la couche superficielle et déterminer le diamètre. Des outils de coupe en carbure ou en diamant sont utilisés pour résister à la dureté du tungstène, et la vitesse de coupe est modérée afin d'éviter l'accumulation de chaleur. Un fluide de coupe chimique est utilisé pour la lubrification et la dissipation de la chaleur, prévenant ainsi les brûlures superficielles et les microfissures.

Dans les applications de formage, la conception des faces d'extrémité est variée : les formes à tête plate sont usinées pour une finition lisse, tandis que les formes à tête concave sont fraisées pour compenser la déformation due au rivetage. Le meulage des côtés de la barre améliore sa circularité, et une faible rugosité de surface réduit le frottement. La précision du formage est obtenue grâce à des tours à commande numérique, avec un contrôle rigoureux des tolérances dimensionnelles permettant un rivetage automatisé. Un traitement thermique après formage évite la concentration des contraintes, et un recuit adoucit la surface pour améliorer l'usinabilité.

Le formage comprend également l'usinage de l'extrémité fixe, comme le filetage ou le rainurage, afin de faciliter l'installation des équipements. Le nettoyage chimique élimine les copeaux et le polissage redonne une finition lisse. L'application du formage aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène illustre la maîtrise dimensionnelle de l'usinage de précision, permettant d'obtenir une finition fiable du profil d'outil grâce à l'optimisation de la trajectoire et offrant un soutien pratique aux opérations de rivetage. Avec les progrès des centres d'usinage, cette application se développe, offrant davantage de possibilités de personnalisation des mandrins.

3.2.2 Application de la déformation plastique aux têtes de rivets en alliage de tungstène

L'application de la déformation plastique aux mandrins de rivets en alliage de tungstène est principalement réalisée par forgeage, étirage et laminage. Ce procédé affine la microstructure frittée et améliore la résistance, la ténacité et l'uniformité de densité du mandrin. La déformation plastique débute par le forgeage à chaud, où la phase liante se ramollit à haute température pour coordonner la déformation des particules de tungstène. Le forgeage multidirectionnel uniformise les contraintes, la diffusion chimique favorise la liaison des particules et la fibrose microstructurale améliore les propriétés axiales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dans les applications de déformation, l'étirage réduit le diamètre, allonge les grains de la barre et améliore sa résistance à la flexion. Le laminage comprend plusieurs passes de réduction ; un recuit intermédiaire élimine la dureté et restaure la plasticité, tandis que le laminage à froid permet d'obtenir une surface lisse. Le mécanisme de déformation plastique repose sur la multiplication et le renforcement par dislocations, la phase liante absorbant l'énergie pour prévenir la rupture fragile. La déformation est contrôlée progressivement, avec une réduction initiale importante pour la mise en forme et une réduction plus faible pour la finition lors des étapes ultérieures.

La déformation plastique améliore la porosité interne et augmente la densité des défauts résiduels fermés. La restauration dynamique après déformation à chaud est active, réduisant ainsi le réarrangement et l'accumulation des dislocations. La protection par atmosphère chimique prévient l'oxydation et la surface déformée est facile à nettoyer. L'application de la déformation plastique aux mandrins en alliage de tungstène illustre la pratique de la déformation à haute température et basse vitesse, optimisant les propriétés mécaniques de l'outil grâce à l'optimisation de sa microstructure et lui conférant une base solide pour les impacts de rivetage. Avec la précision croissante des équipements de déformation, cette application se perfectionne, contribuant à l'amélioration concrète de la résistance des mandrins.

3.2.3 Optimisation de la microstructure des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène par traitement thermique

Le traitement thermique des mandrins à rivets en alliage de tungstène comprend principalement des étapes telles que le recuit, la mise en solution et le vieillissement. Cette optimisation ajuste la taille des grains, la distribution des phases et l'état des défauts, améliorant ainsi l'équilibre entre résistance, ténacité et résistance à la fatigue du mandrin. Le traitement thermique est effectué avant et après usinage. Après frittage, le recuit libère les contraintes résiduelles et la diffusion chimique favorise la migration et l'annihilation des dislocations, réduisant les contraintes internes dans le mandrin et empêchant la propagation des microfissures en cours d'utilisation. La protection sous vide ou sous atmosphère d'hydrogène prévient l'oxydation et la température est contrôlée dans la plage de recristallisation de la phase liante. Pendant le maintien à cette température, la migration des joints de grains affine la structure granulaire.

Le processus d'optimisation comprend également un traitement de mise en solution, où la dissolution à haute température des éléments d'alliage forme une solution solide sursaturée, suivie d'un refroidissement rapide pour la stabiliser. La phase liante ainsi formée renforce le mandrin et améliore sa dureté. Le traitement de vieillissement précipite des phases fines, bloquant les dislocations et limitant leur glissement, ce qui améliore la résilience du mandrin. Le traitement thermique optimise l'adhérence interfaciale et la diffusion des éléments crée une zone de gradient, renforçant la résistance à l'usure de la surface de travail du mandrin. Enfin, l'optimisation permet une sphéroïdisation plus poussée des particules de tungstène, réduisant l'énergie de surface et minimisant les contraintes aux angles vifs.

Le traitement thermique optimise la microstructure, influençant significativement les performances globales du mandrin. Des grains fins confèrent une résistance élevée sans compromettre la ténacité et une déformation coordonnée lors des rivetages répétés. Les paramètres d'optimisation sont ajustés en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fonction de l'alliage : des températures plus élevées favorisent la restauration des alliages tungstène-nickel-fer, tandis que les alliages tungstène-nickel-cuivre offrent une meilleure conductivité thermique et une dissipation de chaleur plus rapide. La maîtrise de la pureté chimique minimise les impuretés et empêche la précipitation de phases anormales. La microstructure du mandrin optimisée par traitement thermique témoigne d'une maîtrise du matériau sur la diffusion thermique, assurant la stabilité des performances de l'outil lors des traitements cycliques et fournissant une base fiable pour les supports de rivetage. Grâce aux progrès des technologies de contrôle des fours, cette optimisation est de plus en plus précise, contribuant ainsi à la durabilité du mandrin.

3.2.4 Application de la technologie de rectification de précision à l'usinage de surface des riveteuses en alliage de tungstène

L'usinage des mandrins à rivets en alliage de tungstène vise principalement à obtenir un état de surface élevé et des dimensions précises. Cette application consiste à enlever progressivement de la matière à l'aide d'une meule ou d'une bande abrasive afin d'obtenir une surface de travail lisse et de contrôler la circularité du mandrin. Le processus de rectification se divise en deux étapes : l'ébauche, qui élimine les surépaisseurs et les défauts de surface ; et la finition, qui améliore l'état de surface. Du point de vue chimique, les meules en diamant ou en carbure de bore résistent à la dureté du tungstène, et la lubrification par liquide de refroidissement dissipe la chaleur et prévient les dommages thermiques.

En pratique, le meulage miroir de la surface de travail de l'éjecteur réduit l'adhérence du rivet, ce qui se traduit par un faible coefficient de frottement et un formage uniforme. Le meulage sans centre ou centré de la partie cylindrique extérieure de l'éjecteur assure un support stable et une circularité élevée. Un contrôle rigoureux du parallélisme lors du meulage de la face d'extrémité garantit un bon ajustement entre l'éjecteur et le rivet. Les procédés de meulage de précision sont adaptés au rapport longueur/diamètre de l'éjecteur en forme de tige, et le mode de fixation évite les vibrations de flexion. Un dressage régulier de la meule maintient le tranchant, et les paramètres de meulage (vitesse et pression) sont adaptés aux caractéristiques des alliages de tungstène.

Les applications de rectification de précision incluent également les formes spéciales, les surfaces concaves ou les rainures obtenues à l'aide de meules de formage. L'éjecteur s'adapte mieux à la déformation du rivet. Le nettoyage chimique élimine les résidus de rectification et le polissage contribue à restaurer l'éclat. Le processus de rectification de précision des éjecteurs en alliage de tungstène illustre le raffinement de l'ingénierie de surface, garantissant des surfaces d'outils de haute qualité grâce à un enlèvement de matière progressif et contribuant à des améliorations pratiques des techniques de rivetage. Avec le développement des rectifieuses CNC, la précision de cette application s'améliore également, offrant davantage de possibilités pour les fonctions de surface des éjecteurs.

3.2.5 Réalisation de formes complexes pour les tiges de rivets en alliage de tungstène par usinage par électroérosion

L'usinage par électroérosion (EDM) permet d'obtenir des formes complexes pour les mandrins de rivets en alliage de tungstène, principalement par enlèvement de matière via une décharge électrique. Cette

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

technique est idéale pour le formage précis de rainures, de formes irrégulières ou de caractéristiques internes sur la face d'extrémité du mandrin, surmontant ainsi les limitations de l'usinage traditionnel. L'EDM utilise une décharge pulsée entre l'électrode-outil et le mandrin ; l'étincelle, chauffée chimiquement, fond et vaporise localement la matière, et le fluide évacue le matériau enlevé. Les alliages de tungstène présentent une bonne conductivité électrique, ce qui assure une décharge stable, et le procédé d'usinage évite toute déformation puisqu'aucune force mécanique n'est appliquée.

L'électrode de l'outil de traitement est formée en négatif à partir de cuivre ou de graphite. La broche d'éjection est fixée dans le fluide de travail et la vitesse de gravure est contrôlée par le paramètre de largeur d'impulsion du courant. Les formes complexes, telles que les surfaces concaves à plusieurs niveaux ou les trous latéraux, sont réalisées par découpe à fil CNC grâce à la programmation de la trajectoire de l'électrode. La broche d'éjection est refroidie et écaillée à l'aide de kérosène ou d'eau déminéralisée comme milieu chimique afin de limiter la formation d'une zone affectée thermiquement. La rugosité de surface est ajustée par électroérosion de précision et restaurée par polissage après la finition de surface.

L'usinage par électroérosion (EDM) présente l'avantage d'être sans contact. Pour les alliages de tungstène à haute dureté, les méthodes de coupe traditionnelles sont difficiles à mettre en œuvre, tandis que l'EDM enlève la matière de façon uniforme. Les petites caractéristiques du mandrin, telles que les microconcavités ou les textures, sont facilement obtenues, améliorant ainsi le maintien des rivets. Un nettoyage chimique élimine la couche blanche et un traitement thermique libère les contraintes résiduelles. L'usinage par électroérosion de mandrins en alliage de tungstène permet un formage flexible de formes complexes, prend en charge diverses conceptions d'outils grâce au mécanisme d'éjection et offre un support personnalisé pour les applications de rivetage spécialisées.

3.1 Caractérisation et contrôle qualité des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

Les mandrins de rivetage en alliage de tungstène sont des éléments essentiels du processus de fabrication. Leur contrôle repose sur la vérification de la constance de la microstructure, de la composition et des propriétés du matériau par des analyses microscopiques, des méthodes spectroscopiques et des essais physiques, garantissant ainsi la fiabilité du mandrin lors du rivetage. La caractérisation porte sur la microstructure et la distribution des éléments, tandis que le contrôle qualité évalue l'uniformité de la densité, la distribution de la dureté et les défauts de surface. L'observation microscopique de la sphéroïdisation des particules et des interfaces de phase, l'identification spectroscopique de la pureté des composants et les essais physiques permettent d'évaluer les propriétés mécaniques.

Un contrôle rigoureux est mis en œuvre tout au long de la production, de la poudre de matière première aux mandrins finis, grâce à un échantillonnage et des tests multipoints permettant d'éviter les écarts entre lots. Des analyses chimiques limitent les impuretés, des contrôles de porosité microscopique et des essais mécaniques de résilience sont effectués. Les données de caractérisation servent à ajuster le procédé et les paramètres de frittage sont optimisés afin de réduire les défauts. Les normes de contrôle qualité sont conformes aux spécifications industrielles et la densité et la dureté des mandrins sont adaptées aux exigences des applications. Des opérations en laboratoire rigoureusement contrôlées garantissent

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'absence de contamination et préviennent ainsi toute interférence avec les résultats. Les mandrins à rivets en alliage de tungstène incarnent le système d'inspection en boucle fermée de l'ingénierie des matériaux et soutiennent la stabilité des performances de l'outil grâce à une collaboration multiméthode, offrant une assurance fiable dans la pratique du rivetage.

3.3.1 Application de l'analyse microscopique aux tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

L'analyse microscopique des mandrins de rivets en alliage de tungstène est principalement réalisée à l'aide de microscopes optiques, de microscopes électroniques à balayage (MEB) et de microscopes électroniques à transmission (MET). Ces techniques permettent d'observer les caractéristiques microstructurales, la distribution des particules et la morphologie des défauts, guidant ainsi l'optimisation des procédés et l'évaluation de la qualité. Les microscopes optiques sont utilisés pour l'observation métallographique préliminaire ; après polissage et attaque chimique de la section transversale de l'échantillon, les particules de tungstène et la phase liante apparaissent nettement contrastées, permettant d'évaluer la sphéroïdisation et l'uniformité de la distribution des phases. L'attaque chimique dissout sélectivement la phase liante, révélant ainsi le contour de la structure en tungstène. La microscopie électronique à balayage (MEB) offre une résolution plus élevée et l'imagerie en rétrodiffusion, révélant une forte luminosité dans la phase tungstène, une phase liante plus sombre et une visibilité nette de l'espacement des particules et des interfaces dans la section transversale de la tige supérieure. La spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) contribue à la cartographie élémentaire, révélant une ségrégation localisée ou des impuretés. L'observation par microscopie électronique en transmission (MET) d'échantillons en coupe mince révèle des dislocations, des joints de grains et des phases précipitées après amincissement ionique, permettant l'analyse du mécanisme d'endommagement par impact de la tige supérieure.

L'analyse microscopique est utilisée pour le contrôle de la production. Après frittage, les échantillons sont inspectés afin de détecter toute porosité résiduelle ; après formage à chaud, la texture fibreuse est observée ; et après usure de surface, la couche endommagée est évaluée. Les résultats analytiques permettent d'optimiser les températures de recuit, d'affiner le grain et d'améliorer la ténacité. L'analyse de la section longitudinale du mandrin garantit son uniformité axiale, et les faces d'extrémité sont utilisées pour détecter les défauts de la surface de travail. La préparation chimique et la protection contre la corrosion sont appliquées de manière appropriée afin d'éviter une dissolution excessive qui masquerait les caractéristiques essentielles. L'utilisation de l'analyse microscopique sur les mandrins de rivets en alliage de tungstène illustre l'intérêt de la caractérisation microscopique en science des matériaux. Grâce à une observation multi-échelle, elle contribue à une meilleure compréhension des propriétés microstructurales, joue un rôle clé dans le contrôle qualité et fournit des preuves visuelles pour améliorer la durabilité des mandrins.

3.3.2 Identification de la composition des mandrins de rivets en alliage de tungstène par des méthodes spectroscopiques

Les méthodes spectroscopiques d'identification de la composition des mandrins de rivets en alliage de tungstène font principalement appel à la fluorescence X, à l'émission optique et à la spectroscopie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'absorption atomique. Ces méthodes fournissent des informations sur la teneur et la distribution des éléments, garantissant ainsi que la composition du mandrin répond aux exigences de conception et empêchant les impuretés d'affecter ses performances. La spectroscopie de fluorescence X permet une analyse non destructive de la composition de surface ; l'intensité de l'excitation de fluorescence caractéristique reflète la proportion de tungstène, de nickel, de fer ou de cuivre. Un balayage multipoint du corps du mandrin permet d'évaluer son uniformité.

La spectroscopie de photoémission consiste à dissoudre l'échantillon, puis à l'exciter par plasma et à utiliser les raies spectrales pour identifier le type et la concentration des éléments. Elle est particulièrement adaptée à la détection d'impuretés à l'état de traces, telles que l'oxygène et le carbone. La spectroscopie d'absorption atomique exploite la lumière caractéristique absorbée par la solution nébulisée pour déterminer avec précision la concentration d'éléments auxiliaires en faibles quantités. L'application des méthodes spectroscopiques est manifeste dans le contrôle des matières premières et des produits finis, notamment pour l'identification de la pureté des lots de poudres et l'analyse de la section transversale des barres supérieures afin de détecter les ségrégations.

La préparation des échantillons est cruciale pour l'identification ; le nettoyage de surface évite toute contamination et l'acide de dissolution présente une sélectivité élevée. Les méthodes spectroscopiques d'identification de la composition des mandrins de rivets en alliage de tungstène garantissent la traçabilité de la qualité et permettent d'ajuster le rapport de mélange en cas d'écarts. Des échantillons de référence chimiques servent à calibrer l'instrument et des mesures répétées assurent la cohérence des résultats. Ces résultats orientent le traitement thermique, la distribution des éléments influençant le comportement de précipitation.

L'utilisation systématique des méthodes spectroscopiques couvre l'échelle macroscopique à microscopique, permettant un criblage rapide de la fluorescence et une quantification précise des émissions. La composition du mandrin reste stable lors des opérations de rivetage, et l'identification spectroscopique fournit une preuve à long terme. L'identification de la composition des mandrins de rivetage en alliage de tungstène par des méthodes spectroscopiques démontre l'intérêt de la chimie analytique pour l'analyse des matériaux, optimise le contrôle de la production grâce à l'information élémentaire et fournit des données fiables sur la qualité des outils.

3.3.3 Importance des essais de densité dans l'évaluation de la qualité des tiges mères de rivets en alliage de tungstène

Le contrôle de densité, essentiel à l'évaluation de la qualité des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, repose principalement sur son rôle d'indicateur direct de la densification globale et de l'uniformité de la microstructure. Ce contrôle permet de déterminer si les propriétés volumétriques du mandrin après frittage et traitement répondent aux exigences de support. La densité reflète le degré de remplissage des particules de tungstène par la phase liante. Les mandrins à haute densité présentent moins de porosité, des forces de réaction inertielles plus importantes, un transfert d'énergie concentré lors des impacts de rivetage et une déformation uniforme du rivet. Les mandrins à faible densité peuvent présenter

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

une porosité résiduelle, une répartition inégale de la résistance et sont sujets à des indentations localisées ou à des dommages dus à la fatigue lors de leur utilisation.

Les tests de densité utilisent généralement la méthode d'Archimède ou la méthode de déplacement de gaz, avec de multiples points d'échantillonnage pour évaluer l'homogénéité de la barre. Une faible différence de densité entre les extrémités et le centre indique un frittage suffisant. Chimiquement, la densité est liée à la composition : une teneur en tungstène plus élevée se traduit par une densité théorique plus élevée. Les écarts constatés lors des tests révèlent la présence de ségrégation ou d'impuretés. Les tests de densité permettent d'ajuster le procédé ; si le frittage est insuffisant, un allongement du temps de maintien ou un pressage isostatique à chaud peuvent améliorer les propriétés mécaniques de la partie supérieure de la barre.

Les essais ont également évalué les effets du traitement thermique ; une légère variation de densité après recuit reflète la relaxation des contraintes, et les dimensions du mandrin restent stables. Les contrôles de densité après finition de surface ont confirmé l'absence de perte de matière et la qualité constante du mandrin. L'importance des contrôles de densité dans l'évaluation de la qualité des mandrins de rivetage en alliage de tungstène réside dans leur capacité à refléter fidèlement les propriétés volumétriques. Les comparaisons numériques permettent un choix d'outils fiable et constituent un gage de qualité pour les opérations de rivetage. Un contrôle précis de la densité est essentiel à la production en série de mandrins, garantissant ainsi des performances optimales pour chaque outil.

3.3.4 Technologie de test pour la détection des défauts internes dans les barres supérieures de rivets en alliage de tungstène

Les techniques de contrôle non destructif (CND) pour la détection des défauts internes des mandrins de rivetage en alliage de tungstène utilisent principalement les ultrasons, les rayons X et les courants de Foucault. Ces méthodes révèlent la porosité, les fissures ou les inclusions sans endommager le mandrin, contribuant ainsi au contrôle qualité et à la prévention des défaillances potentielles. Le contrôle par ultrasons exploite la réflexion des ondes sonores pour localiser les discontinuités internes ; le balayage longitudinal du mandrin en forme de tige détecte les défauts axiaux ; et, par analyse chimique, l'intensité des réflexions interfaciales permet de distinguer la porosité des fissures. L'imagerie par transmission de rayons X révèle les différences de densité, mettant clairement en évidence les zones de faible densité au sein du mandrin, ce qui la rend particulièrement adaptée au contrôle par lots.

Le contrôle par courants de Foucault détecte les défauts de surface ou de subsurface. La sonde, de haute conductivité, révèle, grâce aux perturbations induites par les courants de Foucault, des microfissures ou des ségrégations. Le procédé garantit la propreté de l'échantillon, une couverture complète du parcours de la sonde et un balayage multi-angles pour une meilleure couverture. Il combine différentes techniques de contrôle non destructif, telles que le contrôle par ultrasons profonds, la radiographie X globale et la sensibilité de surface des courants de Foucault.

Les résultats des tests orientent les retouches ; les mandrins défectueux sont réparés ou éliminés par pressage isostatique à chaud ; et la résilience est fiable après nettoyage intérieur du mandrin. Une pureté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chimique élevée réduit les faux signaux et améliore la sensibilité de détection des défauts. La technologie de contrôle non destructif pour la détection des défauts internes dans les mandrins de rivetage en alliage de tungstène démontre la fiabilité des matériaux apportée par l'inspection non destructive. L'utilisation conjointe de plusieurs méthodes garantit la qualité interne de l'outil et fournit une base pour le contrôle des défauts dans les supports de rivetage. L'accumulation des données de détection des défauts jette les bases de boucles de rétroaction du processus, assurant ainsi la performance et la sécurité des lots de mandrins.

3.4 Méthodes innovantes de préparation des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

Les méthodes innovantes de fabrication de mandrins à rivets en alliage de tungstène s'appuient principalement sur le développement de la métallurgie des poudres traditionnelle et l'introduction de nouvelles technologies de formage. Cette innovation permet de surmonter les limitations des procédés conventionnels pour la fabrication de formes complexes, de petites dimensions et la personnalisation des lots, améliorant ainsi la flexibilité de production et l'utilisation des matériaux. Parmi ces méthodes innovantes figurent le moulage par injection et la fabrication additive, qui élargissent le champ des possibles pour la conception des mandrins tout en préservant les avantages de densité et de dureté des alliages de tungstène. Le moulage par injection permet d'obtenir des pièces quasi-finies grâce à un flux d'alimentation, tandis que la fabrication additive permet la superposition de couches et la construction de géométries complexes.

L'innovation de cette approche repose sur la diversité des besoins en outils de rivetage. Si le pressage et le frittage traditionnels conviennent aux pièces standard en forme de barre, la nouvelle méthode s'adapte aux mandrins de formes irrégulières ou miniatures. Sur le plan chimique, l'innovation préserve la structure biphasée, les particules de tungstène assurant le support et la liaison. Ce procédé innovant privilégie également la protection de l'environnement, en réduisant les déchets et la consommation d'énergie. La méthode novatrice de préparation des mandrins de rivetage en alliage de tungstène reflète les tendances actuelles en matière de mise en forme des matériaux, favorisant le développement personnalisé des outils grâce à l'intégration technologique et offrant davantage de possibilités dans le domaine de l'assemblage.

3.4.1 Potentiel du moulage par injection dans la production de mandrins à rivets en alliage de tungstène

Le moulage par injection, utilisé pour la production de mandrins à rivets en alliage de tungstène, repose principalement sur sa capacité à réaliser des formes complexes et des pièces quasi-finies. Ce procédé consiste à mélanger de la poudre d'alliage de tungstène avec un liant organique pour former une charge, laquelle est ensuite injectée sous haute pression dans un moule afin de former une ébauche. Après déliantage et frittage, on obtient le produit fini. Lors de la préparation de la charge, une forte concentration de poudre est obtenue, et des liants, tels que des liants à base de cire ou polymères, assurent la fluidité et la résistance. Chimiquement, le liant enrobe les particules pour empêcher leur séparation. Les paramètres d'injection, comme la température et la pression, sont adaptés à la viscosité de la charge,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et le moule est conçu avec précision, avec des rainures sur les faces d'extrémité ou des orifices latéraux, permettant un moulage en une seule étape et réduisant les traitements ultérieurs.

Le potentiel réside dans la forme personnalisable des éjecteurs. Les surfaces concaves à plusieurs niveaux ou les caractéristiques internes difficiles à réaliser par pressage traditionnel sont facilement obtenues par moulage par injection. Les éjecteurs s'adaptent mieux à la déformation des rivets spéciaux. Les éjecteurs à paroi mince ou élancée présentent une épaisseur uniforme et une densité élevée. Le moulage par injection permet la personnalisation de petites séries, le changement de moule est rapide et les spécifications des éjecteurs sont flexibles, ce qui permet leur adaptation à différents équipements de rivetage. Le déliantage utilise un procédé solvothermique combiné pour l'élimination des liants, et le retrait est contrôlable après frittage, garantissant ainsi une excellente précision dimensionnelle.

Le potentiel de production de cette méthode se traduit également par une efficacité accrue. Les presses à injection automatisées fonctionnent en continu avec des temps de cycle courts, ce qui les rend adaptées à la production de moyennes séries. Elles présentent une bonne stabilité chimique, avec de faibles résidus d'additifs dans la matière première, sans incidence sur les performances de l'éjecteur. Le potentiel du moulage par injection pour la production d'éjecteurs de rivets en alliage de tungstène ouvre de nouvelles perspectives pour la conception d'outillage, permettant la réalisation de fonctions complexes par formage par fluage et démontrant des applications prometteuses dans le rivetage de précision. Le développement de cette méthode a également permis d'optimiser les formulations des matières premières, améliorant ainsi l'homogénéité de la microstructure de l'éjecteur.

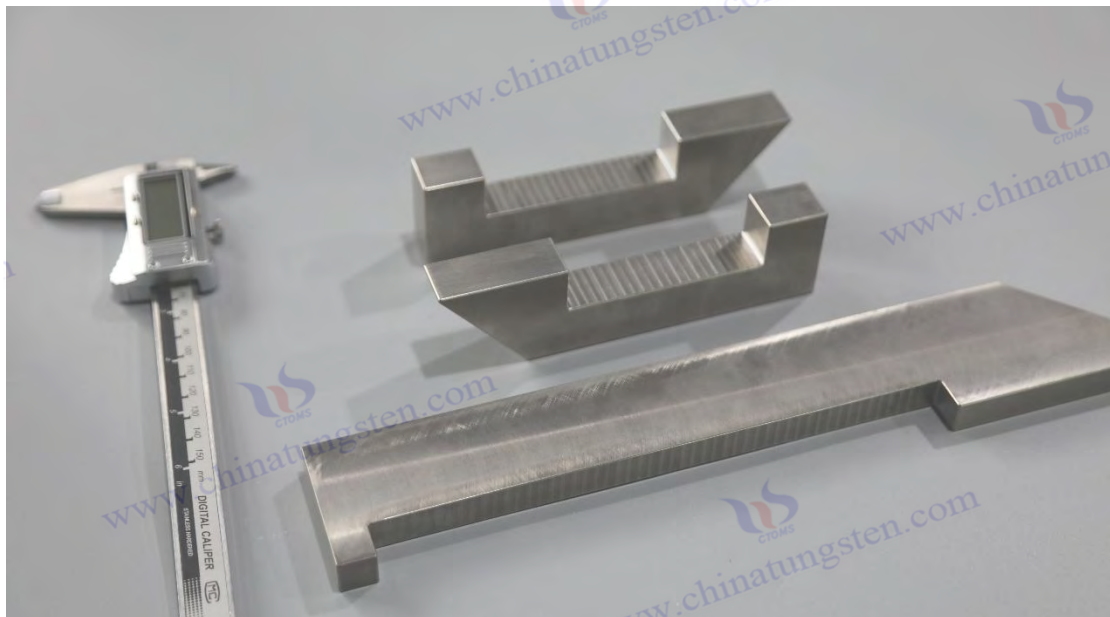
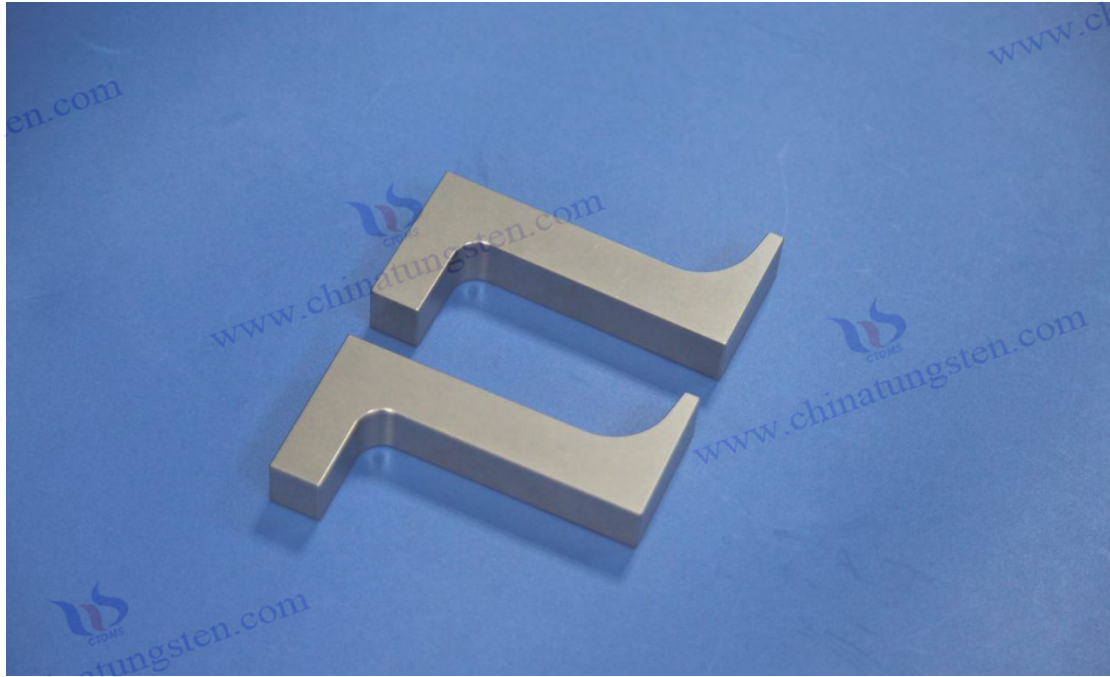
3.4.2 Influence de la technologie de fabrication additive sur la personnalisation des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

La fabrication additive, appliquée à la personnalisation des mandrins à rivets en alliage de tungstène, repose principalement sur la réalisation de géométries et de structures internes complexes par assemblage de couches. Des techniques telles que la fusion sélective par laser (SLM) ou la projection de liant permettent de solidifier sélectivement la poudre d'alliage de tungstène couche par couche pour former des mandrins sans moule. Dans la fusion sur lit de poudre, la fusion laser des particules induit chimiquement un mouillage localisé en phase liquide à haute température, similaire au frittage, assurant une forte liaison métallurgique intercouche. La projection de liant, suivie d'un frittage et d'un déliantage, est particulièrement adaptée aux mandrins creux ou à gradient complexes.

L'avantage principal réside dans la grande liberté de personnalisation, permettant la création directe de microtextures sur la face d'extrémité de l'éjecteur ou sur les canaux de refroidissement internes, ainsi qu'un rivetage optimisé pour la dissipation thermique ou la réduction des vibrations. Les éjecteurs multifonctionnels, difficiles à fabriquer par les procédés traditionnels, peuvent être rapidement itérés grâce à des modèles numériques, raccourcissant ainsi les cycles de conception. La fabrication additive favorise la personnalisation en petites séries, avec des spécifications d'éjecteurs parfaitement adaptées à l'équipement, éliminant ainsi les moules inutiles.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'impact technologique se reflète également dans l'utilisation des matériaux : des taux de récupération de poudre élevés et des mandrins quasi-finis réduisent l'usinage. Chimiquement, la diffusion intercouche est uniforme, ce qui confère au mandrin une microstructure dense aux propriétés proches de celles des mandrins conventionnels. La conception à composition graduelle est possible, assurant une dureté superficielle élevée et une bonne ténacité à cœur. L'influence de la fabrication additive sur la personnalisation des mandrins de rivetage en alliage de tungstène a révolutionné la conception des outils, favorisant l'innovation fonctionnelle intégrée par la stratification et offrant des solutions flexibles pour les applications de rivetage spécialisées.



Tige supérieure de rivet en alliage de tungstène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

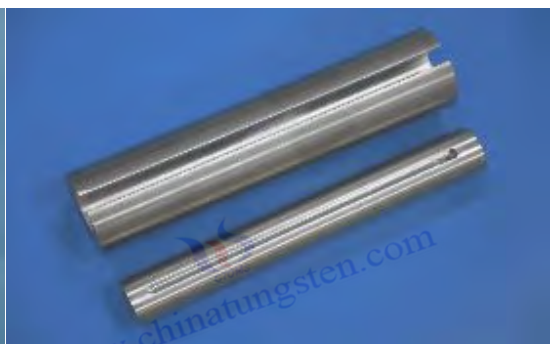
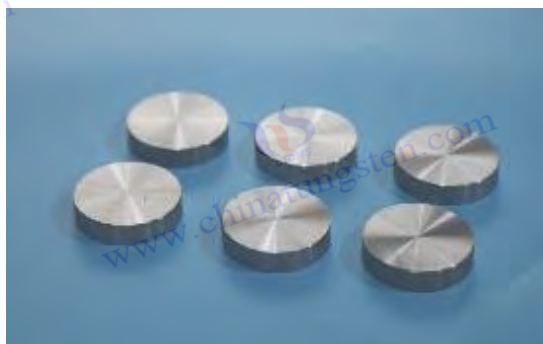
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.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

Chapitre 4 Propriétés physiques des tiges de rivet en alliage de tungstène

4.1 Densité et propriétés thermiques des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

La densité et les propriétés thermiques des mandrins de rivetage en alliage de tungstène sont des éléments essentiels de leurs performances physiques, influençant directement leur force de réaction inertielle, le transfert d'énergie et leur adaptabilité thermique lors du rivetage. Une densité élevée concentre la masse du mandrin, assurant un support stable lors des impacts. Les propriétés thermiques, notamment la dilatation et la conduction thermiques, déterminent la stabilité dimensionnelle et les performances du mandrin en cas de chauffage localisé ou de variations de température ambiante. La structure biphasée des alliages de tungstène confère ces propriétés : la phase tungstène assure la base haute densité, tandis que la phase liante régule la dilatation thermique.

La conception équilibrée de la densité et des propriétés thermiques permet au mandrin de s'adapter à différentes conditions de rivetage. Les mandrins haute densité présentent une inertie élevée et conviennent aux charges importantes, tandis que ceux à bonne conductivité thermique dissipent rapidement la chaleur, limitant ainsi l'échauffement. Des essais de caractérisation guident le choix du matériau ; une densité uniforme garantit une force de réaction constante et une faible dilatation thermique préserve la précision d'assemblage. La densité et les propriétés thermiques des [mandrins à riveter en alliage de tungstène](#) reflètent l'application pratique des propriétés physiques du matériau. L'optimisation des caractéristiques assure la stabilité de l'outil lors de l'assemblage et constitue une base fiable pour la pratique du rivetage.

4.1.1 Principe de mesure de la densité dans les mandrins à rivets en alliage de tungstène

Le principe de mesure de la densité des mandrins à rivets en alliage de tungstène repose principalement sur le calcul du déplacement de volume et de la masse. Ce principe permet d'évaluer la densité et l'uniformité de la microstructure du mandrin, déterminant ainsi ses performances inertielles lors du rivetage. La méthode d'Archimède est couramment utilisée : le mandrin est immergé dans un liquide, son volume est calculé à partir de la différence de poussée d'Archimède, et la densité est déduite de la masse. Le liquide est choisi chimiquement non réactif avec l'alliage afin d'éviter toute dissolution superficielle susceptible d'affecter la précision. Des mesures multipoints du mandrin en forme de tige permettent d'évaluer l'uniformité axiale ; une densité homogène aux extrémités et au centre indique un réarrangement suffisant lors du frittage.

Le principe de mesure inclut également des variantes par déplacement de gaz, où les variations de pression dans un récipient rempli de gaz inerte reflètent le volume, une méthode adaptée aux mandrins sensibles à la surface. Le cœur du principe réside dans l'acquisition précise du volume ; pour les mandrins de forme régulière, un calcul géométrique direct est utilisé, tandis que pour les formes irrégulières, la méthode par déplacement est plus appropriée. Une balance de précision est utilisée pour la mesure de la masse, et la température ambiante permet de corriger la densité du liquide. L'application des principes de mesure de la densité révèle les effets du procédé : un frittage insuffisant entraîne une faible densité, tandis qu'un pressage isostatique à chaud augmente la densité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La mesure est cruciale pour le contrôle qualité des mandrins. Une densité élevée engendre une forte force de réaction inertielle et une déformation uniforme du rivet. La pureté influe sur la mesure ; les impuretés et la porosité diminuent les valeurs mesurées. La mesure segmentée de la longueur du mandrin permet d'éviter les erreurs. Le principe de la mesure de la densité des mandrins à rivets en alliage de tungstène fournit une base quantitative pour les propriétés volumétriques, facilite l'évaluation de l'inertie de l'outil par des calculs de substitution et constitue une référence pratique pour le rivetage.

4.1.2 Contribution du coefficient de dilatation thermique à la stabilité du mandrin à rivets en alliage de tungstène

Le coefficient de dilatation thermique, essentiel à la stabilité des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, se traduit principalement par leur capacité à conserver leurs dimensions et leur forme sous l'effet des variations de température. Cette propriété garantit un ajustement précis du mandrin contre la queue du rivet en cas d'échauffement local par frottement ou de variation de la température ambiante, évitant ainsi tout jeu ou surpression. Les alliages de tungstène présentent un faible coefficient de dilatation thermique ; la phase tungstène, prédominante, subit de faibles variations de volume, tandis que la phase liante ajuste le coefficient global. Il en résulte une augmentation de longueur limitée du mandrin lors du chauffage et une bonne préservation de la planéité de la surface de travail.

interaction biphasique : les particules de tungstène limitent la dilatation de la phase liante, amortissant chimiquement la déformation thermique par contrainte interfaciale, et le mandrin reprend sa forme initiale après des cycles thermiques. Le faible coefficient de dilatation thermique réduit la fissuration sous contrainte thermique, et le mandrin présente une grande stabilité lors d'utilisations répétées. Lors du chauffage pour le rivetage, la dilatation du mandrin est minimale, garantissant un positionnement précis des rivets et une qualité de liaison stable.

Le coefficient de dilatation thermique influe également sur la compatibilité des équipements ; une bonne adéquation thermique entre le mandrin et la riveteuse garantit un assemblage fiable. L'ajustement de la composition permet d'optimiser ce coefficient, le dopage au molybdène le réduisant davantage. Le traitement thermique homogénéise la microstructure, ce qui permet d'obtenir un coefficient de dilatation thermique plus équilibré. L'influence du coefficient de dilatation thermique sur la stabilité des mandrins de rivetage en alliage de tungstène reflète les propriétés thermophysiques du matériau. Une conception à faible dilatation thermique optimise l'adaptabilité de l'outil aux variations de température, assurant ainsi une fiabilité dimensionnelle optimale lors du rivetage.

4.1.2.1 Comportement thermique des mandrins de rivets en alliage de tungstène sous hautes températures

Les variations dimensionnelles, l'évolution de la microstructure et la tendance à l'oxydation superficielle des mandrins de rivetage en alliage de tungstène soumis à des températures élevées sont les principaux phénomènes observés. Ce comportement est particulièrement marqué lors de l'échauffement localisé par friction ou du rivetage à chaud, affectant la tenue dimensionnelle et la précision du support du mandrin. Le point de fusion élevé du tungstène induit une température de ramollissement relativement élevée pour

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

le mandrin. À haute température, la phase liante s'écoule et coordonne les particules de tungstène. La dilatation thermique génère des microcontraintes, mais la liaison interfaciale les amortit, empêchant toute déformation significative. Lorsque la surface de travail du mandrin s'échauffe, l'énergie de surface augmente, les particules de tungstène s'agglomèrent légèrement et la diffusion de la phase liante favorise l'uniformité de l'interface.

Le comportement thermique inclut également la réponse à la fatigue thermique, la migration des joints de grains lors de cycles de chauffage et de refroidissement répétés, une légère croissance des grains dans le mandrin (contrôlable par traitement thermique), la diffusion chimique à haute température, la formation d'une fine couche d'oxyde à la surface du mandrin, la réaction préférentielle de la phase liante, mais la protection globale assurée par la phase tungstène, la conductivité thermique favorisant la dissipation de la chaleur à haute température, un faible gradient de température dans le mandrin et une distribution uniforme des contraintes thermiques. Le comportement thermique du mandrin à haute température est adapté au rivetage à chaud, et la force de réaction du mandrin est stable pendant le formage du rivet.

Le comportement thermique dépend notamment de la composition : une teneur plus élevée en tungstène confère une meilleure stabilité thermique, tandis qu'une proportion plus importante de cuivre favorise une dissipation thermique plus rapide. Le traitement thermique pré-optimise la microstructure, le recuit à haute température élimine les contraintes et le mandrin retrouve efficacement ses propriétés après des cycles thermiques. Les revêtements de surface ou la passivation offrent une protection supplémentaire à haute température, réduisant ainsi les pertes par oxydation. Le comportement thermique des mandrins de rivets en alliage de tungstène à haute température démontre l'adaptabilité thermique des composites réfractaires, préservant les dimensions et les performances de l'outil grâce à la synergie interfaciale, ce qui représente un atout précieux pour l'assemblage à chaud.

4.1.2.2 Comportement des mandrins de rivets en alliage de tungstène dans les environnements à basse température

En milieu froid, les mandrins de rivets en alliage de tungstène présentent principalement une tendance à la fragilisation et un retrait dimensionnel. Ce phénomène se manifeste lors du rivetage à froid ou de l'assemblage à basse température, affectant la résilience et la précision d'ajustement du mandrin. La structure cubique centrée du tungstène réduit les systèmes de glissement à basse température, tandis que la ductilité cubique à faces centrées du liant contribue à la coordination du processus. La température de fragilisation du mandrin reste relativement basse, évitant ainsi une rupture brutale. Lors du retrait à basse température, le faible coefficient de dilatation thermique du tungstène limite les variations dimensionnelles du mandrin, assurant un bon ajustement avec le rivet.

Ce procédé inclut également la relaxation des contraintes thermiques et résiduelles à basse température, ainsi qu'une meilleure cicatrisation des microfissures à l'intérieur du mandrin. Chimiquement, l'activité de l'oxygène à basse température induit une oxydation lente de la surface du mandrin, préservant ainsi un état lisse. L'absorption de l'énergie d'impact à basse température est obtenue par déformation de la phase liante, ce qui garantit une force de réaction constante du mandrin et une formation uniforme des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rivets. Le comportement du mandrin en environnement froid est adapté au rivetage à froid, assurant une charge stable sur l'équipement à basse température de fonctionnement.

Les facteurs influençant la réponse comprennent des ajustements de composition ; une teneur plus élevée en nickel améliore la ténacité à basse température, tandis que l'ajout de fer régule la température de transformation. Un traitement thermique de vieillissement à basse température renforce les précipités et améliore la résistance à la fragilité du mandrin. Un traitement de surface prévient la corrosion par condensation, assurant ainsi la stabilité du mandrin lors du stockage à basse température. La réponse des mandrins de rivets en alliage de tungstène dans des environnements à basse température démontre la grande adaptabilité thermique des matériaux composites, maintenant les performances mécaniques de l'outil grâce à une coordination structurelle et fournissant un support fiable lors de l'assemblage à froid.

4.1.3 Application de la calorimétrie différentielle à balayage aux tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) est principalement utilisée pour analyser le comportement thermique et les caractéristiques de transformation de phase des mandrins à rivets en alliage de tungstène. Cette méthode révèle les processus endothermiques ou exothermiques du mandrin sous l'effet de variations de température en comparant la différence de flux thermique entre l'échantillon et une référence, contribuant ainsi à optimiser les traitements thermiques et à évaluer la stabilité à haute température. Lors de l'essai, un petit échantillon de mandrin est placé dans le creuset de l'instrument et chauffé ou refroidi simultanément avec une référence inerte. La courbe de flux thermique est enregistrée, et les transformations de phase chimique, telles que la fusion ou la précipitation de la phase liante, sont représentées par des variations de pics sur la courbe.

En pratique, la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) est utilisée pour identifier la température de recristallisation du mandrin, permettant ainsi d'optimiser les paramètres de recuit et d'éviter les températures excessives susceptibles d'entraîner un grossissement des grains. La température de mise en solution est déterminée à partir du pic endothermique de la courbe, illustrant clairement la dissolution des éléments d'alliage dans le mandrin. L'analyse du pic exothermique de précipitation lié au vieillissement indique la formation de phases de renforcement, validant ainsi le mécanisme d'amélioration de la résistance du mandrin. L'évaluation de la stabilité à haute température est réalisée en observant le flux thermique au voisinage du point de fusion, ce qui permet de prédire la tendance au ramollissement du mandrin lors du rivetage à chaud.

Cette méthode permet également d'étudier l'influence des impuretés ; la présence d'oxygène ou de carbone résiduels induit des pics supplémentaires, ce qui facilite le contrôle de la pureté du mandrin. Les intégrales de courbe sont utilisées pour calculer la variation d'enthalpie, quantifiant ainsi les variations de la capacité thermique du mandrin. L'application de la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène fournit des informations détaillées sur leur comportement thermique, permet un réglage précis des températures de procédé grâce à l'analyse des transformations et apporte des preuves expérimentales à la gestion thermique des matériaux. La sensibilité de la méthode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

permet de détecter des transitions de phase infimes, offrant ainsi une perspective d'optimisation des performances du mandrin basée sur la température.

4.1.4 Quantification des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène basée sur la mesure de la conductivité thermique

La quantification de la conductivité thermique des mandrins de rivetage en alliage de tungstène repose principalement sur des méthodes en régime permanent ou transitoire. Ces mesures permettent d'évaluer la capacité de dissipation thermique du mandrin lors de la génération de chaleur par rivetage, et d'orienter le choix du matériau sous contraintes thermiques. Les méthodes en régime permanent consistent à chauffer une extrémité et à refroidir l'autre, puis à mesurer le gradient de température et le flux de chaleur ; un essai axial sur l'échantillon de mandrin reflète le transfert thermique réel. Les méthodes transitoires, telles que la scintillation laser, consistent à chauffer par impulsions une face et à enregistrer l'élévation de température de l'autre face, afin de calculer la conductivité thermique.

Les résultats quantitatifs mettent en évidence l'influence de la composition. Une phase cuivre plus riche induit une conductivité thermique plus élevée et une élévation de température locale plus faible dans le mandrin, le rendant ainsi adapté au rivetage en continu. Une phase tungstène prédominante présente une conductivité thermique relativement faible mais une capacité thermique élevée, ce qui permet d'atténuer les pics de température. Pour la préparation des échantillons, une section du mandrin est découpée ; une surface lisse réduit la résistance thermique de contact. Du point de vue chimique, la propreté de l'interface influe sur la mesure, car la diffusion par les impuretés réduit la conductivité thermique.

Les mesures quantitatives de conductivité thermique orientent les applications ; les mandrins à haute conductivité thermique dissipent rapidement la chaleur, assurant un refroidissement uniforme des rivets ; les mandrins à faible conductivité thermique offrent une meilleure isolation, les rendant adaptés au rivetage à chaud. Les mesures évaluent également l'efficacité du traitement thermique, garantissant une microstructure uniforme et une conductivité thermique constante après recuit. Pour les mandrins de longueurs variables, les mesures sont effectuées sur plusieurs segments afin d'obtenir une moyenne et d'éviter les effets de bord. Les mesures de conductivité thermique permettent de quantifier les performances de transfert thermique des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, et les comparaisons numériques facilitent le choix des outils pour l'adaptation thermique, jouant un rôle crucial dans la gestion thermique du rivetage. La nature systématique des mesures rend le comportement thermique des lots de mandrins comparable, fournissant un retour d'information quantitatif pour l'amélioration du procédé.

4.1.5 Le rôle de la capacité thermique massique dans la gestion thermique des mandrins de rivetage en alliage de tungstène

La capacité thermique massique des mandrins de rivetage en alliage de tungstène joue un rôle primordial dans la gestion thermique, notamment en ce qui concerne leur capacité à absorber et à dissiper la chaleur générée par l'impact. Ceci permet de contrôler l'échauffement du mandrin pendant le rivetage, évitant ainsi une surchauffe localisée susceptible d'altérer sa forme ou ses performances. Une capacité thermique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

massique plus élevée se traduit par une meilleure absorption de chaleur par le mandrin, des variations de température plus faibles pour une même énergie fournie, une montée en température plus progressive sur la surface de travail et une zone affectée thermiquement plus réduite lors du rivetage. Les alliages de tungstène contribuent fortement à la capacité thermique massique, ce qui confère au mandrin une capacité thermique globale élevée et une accumulation de chaleur lente en fonctionnement continu.

Le mécanisme d'action se reflète dans la distribution de l'énergie : une partie de l'énergie cinétique d'impact est convertie en chaleur, laquelle est dissipée lorsque la capacité thermique massique est élevée, ce qui engendre un gradient de température plus faible à l'intérieur du mandrin. Chimiquement, la structure biphasée agit en synergie : les particules de tungstène stockent la chaleur tandis que la phase liante la transfère, permettant ainsi un équilibre thermique rapide dans le mandrin. La capacité thermique massique influe également sur la stabilité lors des cycles thermiques ; lors de rivetages répétés, le mandrin retrouve rapidement sa température ambiante avec des variations dimensionnelles minimales.

En matière de gestion thermique, les mandrins à capacité thermique massique élevée sont particulièrement adaptés au rivetage haute fréquence ou intensif, offrant un contrôle précis de l'échauffement et un confort d'utilisation optimal. La composition joue un rôle déterminant : une forte teneur en tungstène confère une capacité thermique massique élevée, tandis qu'une proportion importante de cuivre favorise la conductivité thermique et la dissipation de la chaleur. Le traitement thermique homogénéise la microstructure, garantissant une distribution homogène de la capacité thermique massique. Le rôle de cette dernière dans la gestion thermique des mandrins de rivetage en alliage de tungstène met en évidence la fonction tampon du matériau, qui contribue au contrôle de la température de l'outil grâce à ses propriétés endothermiques et assure une stabilité thermique optimale lors du rivetage. Ces performances accrues permettent au mandrin de s'adapter à un plus large éventail de conditions de travail, améliorant ainsi le confort d'utilisation.

4.2 Propriétés électriques et magnétiques des têtes de rivets en alliage de tungstène

Les propriétés électriques et magnétiques des mandrins à rivets en alliage de tungstène sont principalement influencées par leur composition. Bien que ces propriétés ne constituent pas la fonction première du mandrin en tant qu'outil, elles sont utiles comme référence dans certains environnements d'assemblage ou pour des opérations auxiliaires. Les propriétés électriques sont principalement caractérisées par la conductivité, tandis que les propriétés magnétiques dépendent de la présence ou non de ferromagnétisme dans les éléments de la phase liante. Le tungstène possède une conductivité électrique et thermique modérée ; la phase liante, après alliage, ajuste ces valeurs. Le système tungstène-nickel-cuivre est non magnétique et présente une bonne conductivité électrique, tandis que le système tungstène-nickel-fer présente un magnétisme significatif et une conductivité légèrement inférieure.

L'analyse des propriétés électriques et magnétiques permet de sélectionner le mandrin adapté à des applications spécifiques, comme la prévention des interférences magnétiques lors de l'assemblage électronique et l'obtention d'une conductivité favorisant la décharge électrostatique. Les essais de propriétés orientent la conception de la composition ; les variantes en tungstène-cuivre présentent une conductivité élevée, tandis que les variantes en tungstène-fer possèdent un magnétisme adapté au serrage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les propriétés électriques et magnétiques des mandrins à riveter en alliage de tungstène reflètent la modulation des matériaux des éléments auxiliaires, et ces différences de propriétés contribuent à la polyvalence de l'outil, offrant une plus grande adaptabilité aux pratiques de rivetage.

4.2.1 Conductivité des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

La conductivité des mandrins à rivets en alliage de tungstène dépend principalement du type et de la répartition de la phase liante. Bien que ce ne soit pas un critère primordial, cela influe sur l'accumulation d'électricité statique et la conductivité thermique. Le tungstène possède une conductivité modérée ; cependant, un réseau continu de cuivre au sein de l'alliage permet d'obtenir une conductivité plus élevée, une transmission de courant plus fluide et une dissipation aisée de l'électricité statique à la surface du mandrin, empêchant ainsi l'adsorption de poussière ou d'étincelles lors de l'assemblage. Les systèmes nickel-fer présentent une conductivité relativement plus faible, mais celle-ci reste suffisante pour les applications de support mécanique.

Ce mécanisme se manifeste par une structure pseudo-alliée où la phase cuivre remplit les interstices pour former des canaux, ce qui induit une faible résistance à la migration des électrons et une conductivité axiale uniforme de la tige supérieure. Après frittage, l'interface est propre et le chemin conducteur est continu. Le travail à chaud et le laminage allongent la phase cuivre, ce qui entraîne une légère anisotropie de la conductivité et une faible résistivité globale de la tige supérieure. Le polissage de surface réduit la couche d'oxyde, assurant ainsi une conductivité stable.

La conductivité influe également sur la gestion thermique ; le passage du courant réduit l'échauffement par effet Joule, ce qui ralentit l'élévation de température du mandrin. Une bonne stabilité chimique garantit que la conductivité du mandrin ne diminue pas en milieu humide. Les variantes en tungstène-cuivre présentent des performances encore supérieures, assurant un excellent contrôle électrostatique dans les salles blanches électroniques. La conductivité des mandrins à riveter en alliage de tungstène apporte une assistance électrique à l'outil, facilite l'adaptation aux environnements d'assemblage grâce à l'optimisation des canaux et confère des caractéristiques pratiques aux opérations de rivetage.

4.2.2 Influence des paramètres magnétiques sur l'application des têtes de rivets en alliage de tungstène

L'influence des paramètres magnétiques sur l'utilisation des mandrins de rivetage en alliage de tungstène découle principalement du ferromagnétisme induit par l'ajout de fer. Cette propriété facilite le positionnement et le serrage dans certaines applications d'assemblage. Le système tungstène-nickel-fer présente un magnétisme important, permettant l'attraction du mandrin par des outils magnétiques. Ceci simplifie sa fixation ou son remplacement en cours d'utilisation, et assure notamment un positionnement stable lors du rivetage manuel. Le système tungstène-nickel-cuivre, quant à lui, est amagnétique, évitant ainsi les interférences magnétiques lors de l'assemblage d'instruments électroniques ou de précision et garantissant l'intégrité des composants.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ce mécanisme se manifeste dans la solution solide de la phase liante, où le fer et le nickel forment une phase ferromagnétique à aimantation modérée, conférant au mandrin un léger magnétisme sans magnétisme résiduel important. Un traitement thermique de démagnétisation ou de vieillissement permet de contrôler le niveau magnétique, offrant ainsi une grande flexibilité d'utilisation du mandrin. L'étude des paramètres magnétiques s'inspire également de l'amortissement magnétique en milieu vibratoire, permettant une meilleure absorption des micro-vibrations par le mandrin.

Implications pour l'application : Les mandrins magnétiques conviennent au positionnement mécanique assisté par ligne, tandis que les mandrins non magnétiques sont utilisés pour les équipements sensibles. La pureté chimique est contrôlée par la teneur en fer, et les propriétés magnétiques sont modulables. L'influence des paramètres magnétiques sur les applications de mandrins à rivets en alliage de tungstène démontre la possibilité de moduler les éléments auxiliaires, facilitant ainsi l'utilisation des outils grâce aux différences magnétiques et offrant des options de sélection pour différents scénarios d'assemblage.

4.2.3 Influence du coefficient de température de résistance sur la stabilité électrique de la tige supérieure d'un rivet en alliage de tungstène

Le coefficient de température de résistance (CTR) influe sur la stabilité électrique des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, notamment sur la régulation de la résistance en fonction des variations de température. Cette influence permet de mieux comprendre la conductivité et la réponse électrostatique potentielle du mandrin dans des environnements de rivetage à température variable. Le CTR décrit l'évolution de la résistance avec l'augmentation de la température. Dans les mandrins en alliage de tungstène, il est déterminé conjointement par la phase tungstène et la phase liante. La phase tungstène présente un CTR positif mais faible, tandis que la phase liante, comme le cuivre ou le nickel, possède un coefficient plus élevé. Globalement, le coefficient est positif et la résistance augmente avec la température. La stabilité électrique du mandrin est ainsi assurée en présence de fluctuations de température. Lorsque le coefficient est faible, la variation de résistance est réduite, le chemin conducteur reste continu et les sauts de résistance induits par la température n'affectent pas les fonctions auxiliaires telles que la décharge électrostatique.

Le mécanisme d'influence se manifeste par une interaction diphasique : la diffusion des électrons par les particules de tungstène augmente avec la température, et les variations de concentration des porteurs dans la phase liante régulent la résistivité globale. Le traitement thermique homogénéise la microstructure, ce qui assure une distribution des coefficients homogène et une résistivité axiale stable de la tige supérieure. Les ajustements de composition influent sur le coefficient ; lorsque la phase cuivre est plus abondante, le coefficient se rapproche de la réponse linéaire du cuivre, et la conductivité de la tige supérieure est plus stable sous l'effet des variations de température. La formation d'une couche d'oxyde superficielle à haute température augmente légèrement le coefficient, mais l'effet protecteur du revêtement est atténué et le comportement électrique de la tige supérieure reste inchangé. L'effet du coefficient de température de résistance (CTR) est également utilisé pour évaluer la gestion thermique du mandrin. Un CTR faible entraîne une résistance thermique plus faible et une élévation de température auto-limitée dans le mandrin. À basse température, le CTR est positif, indiquant une diminution de la résistance, mais cela n'est pas directement lié à la fragilité. Le coefficient de température de résistance (CTR) est mesuré par la méthode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des quatre points afin d'optimiser l'alliage. Son influence sur la stabilité électrique des mandrins de rivetage en alliage de tungstène apporte un éclairage sur la réponse du matériau à la température. L'ajustement du CTR favorise l'adaptation de la conductivité de l'outil, garantissant ainsi une base stable lors des variations de température de rivetage.

4.2.4 Observations de l'analyse de la boucle d'hystérésis dans les mandrins de rivets en alliage de tungstène

L'analyse du cycle d'hystérésis des mandrins à rivets en alliage de tungstène est principalement utilisée pour évaluer leur comportement magnétique et leur rémanence, contribuant ainsi à la compréhension de la réponse du mandrin et de son potentiel de positionnement en présence de champs magnétiques. Le cycle d'hystérésis représente la courbe cyclique de l'aimantation en fonction d'un champ magnétique externe. Dans les mandrins en alliage de tungstène, ce comportement est déterminé par le ferromagnétisme de la phase liante ; la phase tungstène est non magnétique. Le cycle d'hystérésis est large dans le système nickel-fer, avec une coercivité et une rémanence importantes, tandis qu'il est étroit et quasi linéaire dans le système tungstène-cuivre non magnétique. Les observations sont réalisées à l'aide d'un magnétomètre à échantillon vibrant, le mandrin étant placé dans un champ magnétique alternatif, et les courbes d'aimantation sont enregistrées.

Le mécanisme d'observation se reflète dans le magnétisme de phase. Le mouvement des parois de domaines magnétiques dans la phase ferreuse produit une hystérésis, et la rémanence après saturation de l'aimantation de la tige supérieure est faible, facilitant ainsi le blocage magnétique. Le traitement thermique ajuste la forme du cycle d'hystérésis, et le vieillissement affine le blocage des parois de domaines magnétiques ; les variations de l'aire du cycle d'hystérésis reflètent l'uniformité de la microstructure. La composition influe sur l'observation : une teneur élevée en fer entraîne un cycle d'hystérésis plus large et une réponse magnétique plus forte de la tige supérieure ; les systèmes à base de cuivre présentent des cycles d'hystérésis plus étroits et une interférence magnétique moindre de la tige supérieure. L'analyse du cycle d'hystérésis est utilisée pour le contrôle qualité des mandrins ; les cycles anormaux révèlent une ségrégation ou des défauts, orientant le processus vers un mélange homogène. L'observation de la rémanence évalue la compatibilité magnétique des mandrins pour l'assemblage électronique, les cycles les plus étroits étant les plus adaptés. Le traitement de surface n'affecte pas directement le cycle, mais le revêtement isole le champ magnétique. L'analyse des boucles d'hystérésis dans les mandrins de rivets en alliage de tungstène fournit une perspective quantitative sur les propriétés magnétiques, soutenant la sélection magnétique des outils grâce aux caractéristiques des courbes et apportant des connaissances pratiques dans les assemblages spécialisés.

4.3 Propriétés optiques et de rayonnement des mandrins à rivets en alliage de tungstène

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène sont principalement caractérisés par leur composition de surface et leur microstructure. Bien que ces propriétés ne constituent pas une fonction essentielle lors de l'utilisation du mandrin comme outil, elles sont importantes pour comprendre la réflexion de la lumière et la réponse aux rayonnements dans certains environnements d'assemblage. Les propriétés optiques sont principalement caractérisées par la réflectivité, tandis que les propriétés de rayonnement concernent la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance aux rayonnements. La microstructure biphasée des alliages de tungstène confère ces propriétés : la phase tungstène présente une surface lisse et une forte réflectivité, tandis que la phase liante module l'absorption des rayonnements. L'analyse des propriétés optiques et de rayonnement permet de sélectionner les mandrins pour des applications spécifiques, comme la réduction des reflets lors de l'assemblage optique et le maintien de la stabilité en milieu radiatif.

L'interaction entre les propriétés optiques et de rayonnement permet au mandrin de s'adapter aux variations de lumière ou de rayonnement. Une réflectivité élevée confère à la surface un aspect brillant et facile à nettoyer, tandis qu'une bonne tolérance aux rayonnements minimise les modifications microstructurales. Les essais de caractérisation guident le traitement de surface, la mesure de la réflectivité optimise le polissage et les essais de rayonnement évaluent les transitions de phase. Les propriétés optiques et de rayonnement des mandrins à rivets en alliage de tungstène reflètent la réponse du matériau à la lumière, et leur ajustement favorise l'adaptabilité de l'outil et assure une stabilité accrue lors du rivetage.

4.3.1 Corrélation de l'analyse de réflectivité des tiges mères de rivets en alliage de tungstène

L'intérêt de l'analyse de réflectivité des mandrins à rivets en alliage de tungstène réside principalement dans l'évaluation de l'état de surface et de la réponse optique. Cette analyse permet de comprendre les performances du mandrin et son comportement en matière de rayonnement thermique sous éclairage. La réflectivité décrit la proportion de lumière réfléchiée par une surface et dépend de l'état de surface des phases de tungstène et de liant présentes dans le mandrin. Une réflectivité plus élevée après polissage confère à la surface un aspect plus brillant, facilitant ainsi l'observation du processus de déformation du rivet. Les couches d'oxyde chimique en surface réduisent la réflectivité, tandis que les revêtements ou la passivation rétablissent l'effet miroir.

Le mécanisme de corrélation se manifeste dans la microstructure : les particules de tungstène présentent une surface lisse à forte réflectivité, une phase liante uniformément répartie avec une faible diffusion de la lumière et une réflectivité constante. Après traitement thermique, les grains sont affinés, ce qui permet une distribution de réflectivité plus uniforme et réduit l'éblouissement lors de l'assemblage du mandrin. L'analyse de la réflectivité est utilisée pour le contrôle qualité ; des valeurs élevées indiquent moins de défauts de surface et une meilleure résistance à l'usure du mandrin. La réponse en longueur d'onde est observée à l'aide d'un spectrophotomètre ; le lustre métallique du mandrin réfléchit fortement la lumière visible. L'analyse de corrélation influe également sur la gestion thermique ; une réflectivité plus élevée entraîne une moindre perte de chaleur par rayonnement et une élévation de température plus lente dans le mandrin. La texture de surface module la réflectivité ; une finition brossée réduit la réflexion spéculaire, la rendant adaptée aux applications anti-éblouissement. Les variations de composition sont également corrélées ; une phase cuivre plus riche induit une réflectivité légèrement supérieure et un aspect plus brillant du mandrin. La corrélation de l'analyse de réflectivité des mandrins à rivets en alliage de tungstène fournit une base pour l'optique de surface, soutient l'adaptation visuelle de l'outil grâce à l'évaluation de la réponse à la lumière et contribue aux caractéristiques pratiques dans les environnements d'assemblage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.3.2 Évaluation de la résistance aux radiations des têtes de rivets en alliage de tungstène

La tolérance aux radiations des mandrins de rivets en alliage de tungstène est principalement évaluée par des essais d'exposition aux radiations et l'observation de leur microstructure. Cette évaluation permet de comprendre la stabilité structurelle et le maintien des performances du mandrin sous irradiation. La tolérance aux radiations décrit la résistance d'un matériau aux radiations ou aux particules. Dans le mandrin, la haute densité de la phase tungstène atténue les radiations, tandis que la phase liante coordonne la réponse aux dommages. Le processus d'évaluation consiste à examiner les variations de densité et les défauts microscopiques après exposition de l'échantillon. Le mandrin a présenté un gonflement minimal et une microstructure intacte après irradiation.

Le mécanisme d'évaluation se reflète dans la structure de phase : les particules de tungstène absorbent l'énergie pour créer des lacunes, et la phase liante diffuse pour combler les défauts, assurant ainsi une bonne stabilité globale du mandrin. Le traitement thermique améliore la résistance aux radiations, et la température de recristallisation élevée limite l'accumulation des dommages. Le mandrin est évalué pour une utilisation dans des assemblages médicaux ou nucléaires ; sa dégradation sous irradiation est lente et son support est fiable. Les essais consistent en une exposition à un gradient de dose afin d'observer l'amorçage des fissures et les transitions de phase.

L'évaluation de la tolérance aux radiations permet d'optimiser la composition, d'utiliser le dopage aux terres rares pour corriger les défauts et d'accroître le seuil de tolérance. Les revêtements de surface protègent contre les radiations incidentes, minimisant ainsi les modifications de la microstructure du mandrin. Les résultats de l'évaluation sont intégrés au procédé, démontrant une excellente tolérance après frittage et densification. L'évaluation de la tolérance aux radiations des mandrins de rivets en alliage de tungstène offre une perspective de matériau adapté à l'environnement, garantit la compatibilité de l'outil avec les radiations grâce à l'analyse des dommages et constitue un fondement solide pour les applications de rivetage spéciales.

4.3.3 Caractérisation du spectre d'absorption dans les propriétés optiques des mandrins à rivets en alliage de tungstène

La caractérisation des propriétés optiques des mandrins de rivets en alliage de tungstène par spectroscopie d'absorption est principalement réalisée par analyse spectroscopique UV-visible-proche infrarouge. Cette caractérisation permet de comprendre le comportement d'absorption de la lumière à la surface du mandrin et dans sa structure globale, et d'évaluer ses caractéristiques de réflexion et de transmission à différentes longueurs d'onde. Les spectres d'absorption enregistrent l'intensité d'absorption du matériau pour des longueurs d'onde spécifiques. Les tests sont effectués sur des échantillons de mandrins polis ; les pics d'absorption caractéristiques sont générés par les transitions électroniques dans la phase tungstène, tandis que les phases de liant, telles que le cuivre ou le nickel, modulent la forme spectrale. Chimiquement, la couche d'oxyde superficielle augmente l'absorption ; le polissage élimine cette couche, ce qui permet d'obtenir des raies spectrales plus lisses.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'étape clé de la caractérisation réside dans la préparation de l'échantillon. La section transversale ou la surface de la sonde doit être plane, et le faisceau lumineux doit être incident perpendiculairement lors du test afin d'enregistrer la courbe d'absorption. Les sondes en alliage de tungstène présentent une forte absorption dans le visible, avec une diminution correspondante de la réflectivité. La texture brossée de la surface accroît la diffusion et l'absorption de la lumière. Les modifications microstructurales après traitement thermique affectent les raies spectrales ; le recuit affine les grains et assure une absorption uniforme. Les variations de composition contribuent aux différences de caractérisation ; une teneur plus élevée en phase cuivre entraîne une absorption plus forte dans le proche infrarouge, et le comportement de rayonnement thermique de la sonde varie.

L'application de la spectroscopie d'absorption est manifeste dans le contrôle qualité des surfaces ; les anomalies d'absorption révèlent l'oxydation ou la contamination, guidant ainsi les opérations de polissage. Les spectres d'absorption des mandrins dans des environnements d'assemblage éclairés permettent d'évaluer l'éblouissement ; des raies spectrales plates indiquent des réflexions plus douces. Les tests de stabilité chimique révèlent des modifications des spectres d'absorption, avec un déplacement des pics d'absorption après corrosion. La caractérisation des propriétés optiques des mandrins de rivets en alliage de tungstène par spectroscopie d'absorption offre une perspective spectroscopique sur l'interaction de la lumière, contribue à l'optimisation de la surface des outils par l'analyse des courbes et fournit une base pour l'adaptation visuelle lors des opérations de rivetage.

4.3.4 Contribution de la section efficace d'absorption des neutrons au blindage contre les rayonnements de la tige supérieure d'un rivet en alliage de tungstène

La section efficace d'absorption des neutrons, essentielle à la protection contre les rayonnements de la tige supérieure du rivet en alliage de tungstène, réside principalement dans sa capacité à atténuer le flux neutronique. Cette contribution permet de réduire l'impact du rayonnement neutronique lorsque la tige supérieure est utilisée comme composant de blindage auxiliaire. Les noyaux de tungstène présentent des sections efficaces de diffusion et d'absorption des neutrons élevées, la structure à haute densité de la tige supérieure renforce l'atténuation volumique et la phase de liaison module la réponse globale. La section efficace d'absorption des neutrons décrit la probabilité de réactions nucléaires ; les isotopes du tungstène contribuent principalement à la diffusion et à l'absorption des neutrons d'énergie modérée.

Le mécanisme de contribution se manifeste par une diffusion multiple. Après leur entrée dans la barre supérieure, les neutrons perdent de l'énergie cinétique par collisions multiples, et une partie est absorbée. L'atténuation est d'autant plus marquée que l'épaisseur de la barre supérieure est importante. Chimiquement, l'introduction de noyaux légers tels que l'hydrogène dans les éléments d'alliage peut contribuer à modérer la diffusion, mais le système de la barre supérieure étant principalement composé de tungstène, la diffusion demeure le processus prédominant. Le traitement thermique ne modifie pas la section efficace, mais améliore le trajet de diffusion effectif en permettant d'obtenir une microstructure plus uniforme.

La contribution de la section efficace d'absorption neutronique a été évaluée par simulation et par expérimentation. Le mandrin agit comme un écran local en milieu radiatif, réduisant l'impact des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

neutrons diffusés sur l'environnement. La composition influe sur cette contribution ; une teneur plus élevée en tungstène induit une section efficace plus importante et un effet de blindage plus stable. L'état de surface influe sur le rayonnement incident ; le polissage réduit les pertes par réflexion. La contribution de la section efficace d'absorption neutronique du mandrin de rivet en alliage de tungstène offre une perspective de physique nucléaire sur l'interaction du rayonnement, contribuant à la sécurité des outils dans les assemblages soumis à des rayonnements grâce à l'atténuation et en jouant un rôle de blindage dans des environnements spécifiques.

4.4 Fiche de données de sécurité des tiges de rivets en alliage de tungstène de CTIA GROUP LTD

La fiche de données de sécurité (FDS) des mandrins à rivets en alliage de tungstène fabriqués par Zhongwu Intelligent Manufacturing est un document d'information sur la sécurité relatif aux outils en forme de tige en alliage de tungstène produits par Zhongwu Intelligent Manufacturing. Ce document est conforme aux normes internationales et aux réglementations nationales en vigueur. Il fournit une évaluation des risques et des recommandations de protection pour les matériaux lors de la production, du transport, du stockage, de l'utilisation et de l'élimination. Les mandrins en alliage de tungstène de Zhongwu Intelligent Manufacturing comprennent principalement les séries tungstène-nickel-fer et tungstène-nickel-cuivre, utilisés pour l'assemblage et la connexion de composants, etc.

La structure générale d'une fiche de données de sécurité (FDS) est généralement divisée en plusieurs sections, chacune analysant le comportement du matériau d'un point de vue chimique. Par exemple, les informations sur la composition mettent l'accent sur les propriétés composites du mandrin en alliage de tungstène, le tungstène étant l'élément principal assurant une base à haute densité, tandis que les éléments liants tels que le nickel et le fer influencent les réactions potentielles au contact de la peau. Lors de l'élaboration de la FDS, China Tungsten Manufacturing Co., Ltd. a pris en compte les caractéristiques de préparation de l'alliage par métallurgie des poudres. Les procédés de frittage et de laminage peuvent introduire des impuretés à l'état de traces ; par conséquent, le document spécifie les mesures de contrôle de la pureté afin d'éviter les risques supplémentaires liés aux oxydes ou aux carbures. La section relative au transport traite de la stabilité du mandrin en alliage à l'état solide, en insistant sur l'importance d'un emballage étanche à l'humidité pour prévenir l'oxydation superficielle. La section sur l'élimination des déchets présente les modalités de recyclage, de conformité aux exigences environnementales et de récupération des ressources en tungstène par réduction chimique.

La composition chimique des mandrins de rivetage en alliage de tungstène est détaillée. Le tungstène est généralement le composant principal, assurant la haute densité et la dureté de l'alliage. Il est complété par du nickel, du fer ou du cuivre comme liants. Les proportions sont ajustées selon la série ; par exemple, dans un système tungstène-nickel-fer, le rapport nickel/fer optimise le mouillage et le renforcement. Les éléments traces tels que le carbone et l'oxygène sont maintenus à de faibles concentrations afin d'éviter la formation de phases fragilisantes. Cette section utilise les numéros CAS pour identifier les éléments : tungstène CAS 7440-33-7, nickel CAS 7440-02-0. Les impuretés sont mentionnées, notamment les contaminants potentiels tels que le phosphore et le soufre, provenant des matières premières, et les procédés de purification permettant d'en réduire la teneur sont décrits.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le mandrin en alliage de tungstène comprend également une description de la structure de phase de l'alliage. Dans ce composite biphasé, les particules de tungstène présentent une structure cubique centrée, tandis que la phase liante est une solution solide cubique à faces centrées. Il est chimiquement stable et ne contient aucun composant volatil. L'analyse de solubilité montre que le matériau est insoluble dans l'eau, réagit lentement avec les acides faibles et libère du tungstate. La déclaration de pureté indique que le mandrin en alliage est préparé par métallurgie des poudres et présente une grande homogénéité d'un lot à l'autre.

Pour les mandrins à rivets en alliage de tungstène de Zhongwu Intelligent Manufacturing, une évaluation systématique des risques sanitaires, physiques et environnementaux liés au matériau est réalisée en fonction de la réactivité chimique de l'alliage. Les risques sanitaires concernent principalement les poussières et débris générés lors de la fabrication ; les particules de tungstène peuvent provoquer des irritations mécaniques, tandis que le nickel présente un potentiel sensibilisant, pouvant entraîner des réactions allergiques cutanées ou respiratoires. Les risques physiques incluent le risque d'impact dû à la densité élevée du mandrin en alliage, ainsi que le risque d'inflammation lié aux étincelles produites lors de la découpe. L'évaluation des risques environnementaux prend en compte la faible solubilité des alliages de tungstène, qui ne s'infiltrent pas facilement dans le sol lors de leur élimination ; cependant, la poudre peut affecter les organismes aquatiques par accumulation et sédimentation.

La méthode d'identification adopte la norme SGH, et la tige supérieure en alliage de tungstène est classée comme un solide non dangereux.



Tige supérieure de rivet en alliage de tungstène CTIA GROUP LTD

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

Chapitre 5 Propriétés mécaniques des tiges de rivet en alliage de tungstène

5.1 Résistance et dureté des têtes de rivets en alliage de tungstène

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène doivent leurs propriétés mécaniques essentielles à leur résistance à la déformation et à leur durabilité lors des opérations de rivetage et de maintien. La résistance inclut la résistance à la traction, à la compression et aux chocs, tandis que la dureté reflète la résistance de la surface à l'indentation et à l'usure. La structure biphasée des alliages de tungstène confère ces propriétés : les particules de tungstène forment un squelette de haute dureté, tandis que la phase liante assure la ténacité et prévient la rupture fragile. Cet équilibre entre résistance et dureté permet au mandrin de supporter des charges répétées, garantissant ainsi une formation uniforme des rivets.

La résistance et la dureté proviennent du procédé de métallurgie des poudres, suivi d'un traitement thermique pour affiner la microstructure après frittage et densification, ce qui confère au mandrin une résistance axiale élevée et une dureté superficielle uniforme. Chimiquement, la liaison interfaciale est forte et la distribution des contraintes est progressive. Des méthodes d'essai normalisées sont utilisées : la résistance est évaluée par des essais de traction ou de choc et la dureté est mesurée par indentation. L'optimisation des performances est obtenue par ajustement de la composition et du traitement thermique ; une teneur en tungstène plus élevée induit une plus grande dureté, tandis qu'une proportion plus importante de phase liante favorise une meilleure ténacité.

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène utilisés dans les outils de rivetage garantissent un support fiable, une déformation minimale et une qualité d'assemblage stable. En pratique, la résistance et la dureté sont adaptées au matériau du rivet : les mandrins haute résistance sont utilisés pour les rivets en acier, tandis que les mandrins équilibrés conviennent aux rivets en aluminium. La résistance et la dureté des mandrins en alliage de tungstène illustrent les avantages mécaniques des matériaux composites, contribuant à l'amélioration des processus d'assemblage grâce à une meilleure coordination des performances et offrant une réelle valeur ajoutée pour les assemblages industriels.

5.1.1 Méthode d'essai de résistance à la traction des mandrins à rivets en alliage de tungstène

La méthode d'essai de résistance à la traction des mandrins de rivets en alliage de tungstène repose principalement sur l'essai de traction standard. Cette méthode évalue la capacité de charge en traction et le comportement à la rupture du mandrin sous charge uniaxiale, permettant ainsi de comprendre la réponse du matériau sous contrainte de traction. Les échantillons d'essai sont découpés dans le mandrin ou usinés en forme d'halète ou de cylindre à l'aide d'une ébauche spéciale, avec des surfaces lisses afin d'éviter les concentrations de contraintes. La machine d'essai fixe les deux extrémités de l'échantillon, applique une tension uniforme et enregistre les courbes charge-déplacement. Le glissement des dislocations chimiques et la séparation des interfaces sont les principaux mécanismes de déformation.

La méthode comprend un alignement préalable, un chargement continu et une mesure post-rupture. La phase liante du mandrin coordonne la déformation des particules de tungstène, et la courbe de traction présente des segments élastiques et ductiles. L'observation et l'analyse de la surface de rupture révèlent

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

un mécanisme de rupture ductile, avec des cupules indiquant une rupture ductile et des tendances fragiles dans les plans de clivage. L'environnement d'essai est à température ambiante contrôlée ; tout effet lié à la température doit être pris en compte. Cette méthode d'essai de résistance à la traction pour les mandrins en alliage de tungstène révèle une synergie biphasique : la phase tungstène supporte des charges élevées, tandis que la phase liante absorbe l'énergie. Ce test est utilisé pour le contrôle de la qualité des matériaux et la vérification des procédés. Après frittage, la résistance à la traction du mandrin est évaluée en fonction de sa densité, et l'effet de renforcement est comparé après traitement thermique. La pureté chimique influe sur le test ; les impuretés réduisent la résistance. La forme cylindrique du mandrin permet un échantillonnage axial, reflétant la contrainte réelle. La méthode d'essai de résistance à la traction des mandrins de rivetage en alliage de tungstène offre une approche quantitative des propriétés de traction, contribue à l'évaluation de la résistance des outils par l'analyse des courbes et constitue une référence pour la conception des rivets.

5.1.1.1 Mécanisme de rupture des têtes de rivets en alliage de tungstène sous charge statique

Sous charge statique, le comportement des mandrins de rivets en alliage de tungstène est principalement lié à la réponse aux contraintes et à l'accumulation des dommages au sein de leur microstructure biphasée. Ce mécanisme est mis en évidence par des essais de traction ou de flexion, permettant d'analyser le mode de rupture du mandrin sous charge lente. Dans un premier temps, une déformation élastique se produit : le squelette de particules de tungstène supporte la contrainte principale tandis que la phase liante coordonne la déformation. À mesure que la charge augmente, les dislocations se multiplient dans la phase liante, les contraintes se concentrent à l'interface et, bien que la zone de diffusion des éléments assure un effet tampon chimique, la ségrégation des impuretés favorise la formation de micropores.

Aux stades ultérieurs du processus, les micropores fusionnent pour former des cavités, provoquant un striction des grains de tungstène. La phase liante entre les grains de tungstène s'étire et s'amincit, et la rupture finale est principalement due à la séparation de l'interface ou à la fracture des grains. Les caractéristiques de la fracture présentent un mélange de cupules et de clivage, avec une prédominance de cupules dans la phase liante et des surfaces de clivage planes dans la phase tungstène. Le traitement thermique optimise ce mécanisme ; le recuit affine les grains, réduit l'amorçage des cavités et améliore la ductilité à la rupture des grains de tungstène.

Le mécanisme de chargement statique est également influencé par la composition. Le système nickel-cuivre présente un taux d'alvéoles élevé et un allongement à la rupture important ; le système nickel-fer offre une résistance élevée mais une tendance au clivage légèrement plus marquée. Une pureté chimique moindre engendre moins d'impuretés et un mécanisme plus ductile. La force exercée sur le mandrin cylindrique est axiale et le mécanisme se répartit sur toute sa longueur.

5.1.1.2 Effet de la charge dynamique sur la tige supérieure du rivet en alliage de tungstène

Les charges dynamiques appliquées aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène se manifestent principalement par l'absorption d'énergie d'impact et la déformation. Cet effet est particulièrement visible lors du rivetage à grande vitesse ou en conditions de vibration, où le mandrin sert de support et supporte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des charges élevées instantanées. Lors d'une charge dynamique, l'énergie est rapidement absorbée, le squelette de particules de tungstène résiste à la compression, la phase de liaison coordonne la déformation pour absorber une partie de l'énergie cinétique, l'empreinte sur la surface de travail du mandrin est uniforme et la queue du rivet présente une forme homogène. Les dislocations chimiques se multiplient rapidement, des ondes de contrainte se propagent au sein du mandrin et la liaison interfaciale amortit les chocs et empêche la séparation.

Les effets incluent également ceux de la vitesse de déformation, avec une légère augmentation de la résistance sous charge dynamique et une meilleure résistance à la déformation du mandrin. Cependant, des charges excessives peuvent induire des micro-dommages. Des effets thermiques accompagnent la charge dynamique : l'échauffement par frottement provoque des élévations de température localisées, et la conductivité thermique de l'alliage de tungstène contribue à la dissipation de la chaleur, ce qui engendre un faible gradient de température dans le mandrin. Les charges dynamiques répétées accumulent la fatigue, ce qui ralentit la propagation des micro-défauts dans le mandrin et assure une durée de vie stable. Parmi les facteurs influençant la charge dynamique figurent le diamètre du mandrin et la forme de sa face d'extrémité ; les diamètres plus importants induisent une inertie plus forte et une meilleure absorption d'énergie, tandis que les surfaces concaves réduisent la concentration des contraintes et minimisent la déformation. L'optimisation du traitement thermique joue également un rôle ; le recuit réduit les contraintes résiduelles, ce qui permet une réponse dynamique plus régulière du mandrin. L'impact de la charge dynamique sur les mandrins de rivets en alliage de tungstène reflète le comportement du matériau en environnement d'impact, favorisant l'adaptation dynamique de l'outil par absorption et coordination, et contribuant ainsi à une stabilité pratique lors du rivetage à grande vitesse.

5.1.2 Quantification de la dureté Vickers des mandrins à rivets en alliage de tungstène

La dureté Vickers des mandrins de rivetage en alliage de tungstène est principalement quantifiée par un essai à l'indenteur diamant. Cette quantification permet d'évaluer la résistance à l'indentation de la surface du mandrin, reflétant ainsi sa durabilité lors du rivetage. L'essai consiste à polir l'échantillon de mandrin, à appliquer une charge avec l'indenteur pour créer une empreinte carrée, puis à mesurer la diagonale pour calculer la valeur de dureté. Chimiquement, la phase tungstène détermine la dureté, tandis que la phase liante module la dureté globale. Une dureté élevée sur la surface de travail du mandrin contribue à sa résistance à l'indentation lors du rivetage. L'uniformité du processus de quantification est évaluée par des mesures multipoints ; une dureté constante le long de l'axe et sur la face d'extrémité de la tige indique une microstructure stable. Le traitement thermique influe sur la quantification ; le recuit réduit la dureté et augmente la ténacité, tandis que la précipitation due au vieillissement augmente la dureté et renforce la surface. Les variations de composition permettent de quantifier les différences ; une teneur plus élevée en tungstène augmente la dureté, tandis qu'une teneur plus élevée en cuivre confère une dureté modérée. Les traitements de surface, tels que le plaquage, quantifient la dureté superficielle et améliorent la résistance à l'usure de la tige. La quantification de la dureté Vickers oriente le choix du mandrin : les mandrins à haute dureté sont utilisés pour les rivets durs, tandis que les mandrins à faible dureté offrent un bon compromis pour l'absorption des chocs. Cette quantification permet également d'évaluer les résultats d'usinage, garantissant une dureté uniforme et une surface de mandrin homogène après rectification. La quantification de la dureté Vickers des mandrins à rivets en alliage de tungstène fournit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

une référence numérique pour les propriétés de surface, étaye l'évaluation de la résistance à l'usure des outils par analyse d'indentation et contribue à l'assurance qualité des opérations de rivetage.

5.1.3 Évaluation des tiges de rivet en alliage de tungstène par essai de traction

Les mandrins de rivetage en alliage de tungstène sont principalement caractérisés par des essais de traction uniaxiale. Cette évaluation permet de comprendre la capacité de charge et le comportement à la rupture du mandrin sous contrainte de traction, fournissant ainsi une référence de résistance pour les supports de rivetage. L'éprouvette est découpée dans le mandrin selon une forme standard, fixée et étirée à vitesse constante. La courbe charge-déplacement est enregistrée. Chimiquement, la phase liante s'étend et coordonne les particules de tungstène. La courbe présente une phase élastique et une phase plastique.

Le processus d'évaluation a analysé la limite d'élasticité et l'allongement à la rupture. Une forte proportion de la phase liante dans le mandrin a conféré une bonne plasticité, tandis que la phase tungstène, dominante, a permis d'obtenir une résistance élevée. L'observation de la surface de rupture a permis d'évaluer le mécanisme de rupture ; les cupules ont indiqué une ductilité, tandis que les plans de clivage ont montré une tendance à la fragilité. L'efficacité du traitement thermique a été évaluée ; le recuit a amélioré l'allongement et la ténacité du mandrin. Les différences de composition ont été évaluées ; le système nickel-cuivre a présenté une forte ductilité, tandis que le système nickel-fer a affiché une résistance élevée.

Les essais de traction évaluent les propriétés axiales des mandrins, tandis que les essais de contrainte par barres simulent les charges latérales. Cette évaluation oriente le processus de fabrication : le frittage garantit une résistance à la traction stable, tandis que le travail à chaud et la fibruration augmentent la résistance. Les essais de traction offrent une perspective expérimentale sur la réponse en traction des mandrins de rivets en alliage de tungstène, contribuant à la compréhension de la résistance de l'outil grâce aux courbes et aux surfaces de rupture, et fournissant une base d'évaluation pour la conception des rivets.

5.1.4 Évaluation des têtes de rivets en alliage de tungstène par essai de compression

Les essais de compression des mandrins à rivets en alliage de tungstène sont principalement réalisés par des essais de compression axiale. Cette évaluation permet de comprendre la capacité de charge en compression et le comportement à la déformation du mandrin lors du rivetage, fournissant ainsi une référence pour les performances de l'outil sous charges d'impact. L'échantillon d'essai est un court segment cylindrique découpé dans le mandrin, présentant des faces d'extrémité parallèles et lisses. Une charge axiale est appliquée par la machine d'essai et la courbe contrainte-déformation est enregistrée. Du point de vue chimique, le squelette de particules de tungstène résiste à la compression, tandis que la phase liante contrôle l'expansion latérale, évitant ainsi une déformation prématurée du corps.

Le processus d'évaluation a analysé la limite d'élasticité et la résistance à la traction. La structure biphasée du mandrin a induit un plateau plastique sur la courbe de compression après la phase élastique, la phase liante s'étendant et absorbant l'énergie. Un gonflement latéral a été observé sur l'échantillon fracturé ; une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

déformation uniforme a été constatée lorsque le mandrin présentait une bonne ténacité. Les essais ont été réalisés à température ambiante, et des essais à haute température ont permis d'évaluer l'adoucissement thermique. L'évaluation par essai de compression du mandrin en alliage de tungstène a révélé sa réponse en compression ; une teneur élevée en tungstène a permis d'obtenir une résistance stable, et le rapport de la phase liante était bien équilibré avec la ténacité.

Les essais de compression orientent le processus d'évaluation. La densification par frittage confère une résistance à la compression élevée, tandis que la fibrification par travail à chaud améliore la résistance à la compression axiale. La pureté chimique influe sur l'évaluation ; les impuretés réduisent la résistance. La forme cylindrique du mandrin permet de simuler la compression du support réel. Les essais de compression offrent une perspective expérimentale sur la contrainte de compression lors de l'évaluation des mandrins de rivetage en alliage de tungstène. L'analyse des courbes contribue à la compréhension de la capacité de charge de l'outil et étaye les principes d'évaluation en pratique du rivetage.

5.1.4.1 Étude de l'influence de la vitesse de déformation sur les mandrins de rivets en alliage de tungstène

Les études sur l'influence de la vitesse de déformation sur les mandrins de rivetage en alliage de tungstène portent principalement sur la réponse de la vitesse de chargement à la déformation et à la résistance. Ces recherches permettent d'analyser les différences de performance des mandrins à différentes vitesses de rivetage. À faibles vitesses de déformation, la déformation du mandrin est lente, la phase liante coordonne efficacement les particules de tungstène, ce qui confère une résistance stable et un long plateau de plasticité. À vitesses de déformation élevées, comme lors du rivetage par impact, la multiplication des dislocations est rapide, ce qui augmente la résistance du mandrin mais diminue sa plasticité. Chimiquement, la phase liante présente une sensibilité à la vitesse de déformation, modulant ainsi la réponse globale.

L'étude a utilisé des essais de compression à vitesse graduée ou de chute de masse, en enregistrant des courbes pour comparer le comportement à la limite élastique et à la rupture. À des vitesses de déformation élevées, l'échauffement adiabatique a entraîné un ramollissement localisé du mandrin, mais la structure en tungstène a assuré la contrainte, permettant un bon contrôle de la déformation. L'étude a révélé une synergie biphasique : le rapport des particules de tungstène était insensible, conférant la rigidité, tandis que le rapport de la phase liante était sensible, absorbant l'énergie. Le traitement thermique a été étudié, montrant que le recuit réduisait la vitesse de déformation et que le mandrin s'adaptait à une large gamme de vitesses de compression.

L'étude de l'influence de la vitesse de déformation oriente les applications : le rivetage manuel à faible vitesse de déformation offre une bonne ténacité, tandis que le rivetage pneumatique privilégie la résistance à haute vitesse de déformation. Les analyses de composition chimique révèlent une prédominance de la phase cuivre, ce qui confère au mandrin une faible sensibilité à la vitesse de déformation et une grande stabilité à haute vitesse. L'étude de l'influence de la vitesse de déformation sur les mandrins de rivetage en alliage de tungstène apporte un éclairage sur le comportement des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

matériaux lors des chargements dynamiques, et les comparaisons de vitesses permettent d'adapter la vitesse de l'outil, contribuant ainsi à l'avancement de la recherche sur le rivetage à vitesse variable.

5.1.4.2 Apports de l'analyse des surfaces de rupture des têtes de rivets en alliage de tungstène

L'analyse des surfaces de rupture des mandrins de rivets en alliage de tungstène, principalement par microscopie électronique à balayage (MEB), permet d'obtenir des informations précieuses sur ces matériaux. Cette analyse révèle les mécanismes de rupture et les caractéristiques microstructurales, contribuant ainsi à l'amélioration de la conception des mandrins résistants aux chocs. Les surfaces de rupture présentent une combinaison de cupules et de clivage ; la profondeur des cupules dans la zone de liaison reflète la ductilité, tandis que la planéité des surfaces de clivage des grains de tungstène indique une fragilité générale. Du point de vue chimique, la distribution des éléments est observée dans les zones de séparation interfaciales, avec une ségrégation importante des impuretés lorsque la liaison est faible.

Le nettoyage de l'échantillon après fracture a révélé un chemin de fracture complexe dans la tige supérieure. L'imagerie par microscopie électronique à fort grossissement a montré que la fracture s'étendait le long de la phase liante et que les particules de tungstène présentaient une fracture minimale. L'analyse sous différentes conditions de chargement a révélé de nombreuses cupules sur la surface de fracture statique et des bandes de cisaillement distinctes sur la fracture dynamique. L'analyse du traitement thermique a montré des cupules uniformes après recuit, tandis que le vieillissement a modifié le chemin de fracture en raison de la précipitation par ancrage.

L'analyse des surfaces de rupture permet de mieux maîtriser le procédé, en révélant les défauts de frittage et en optimisant la densification afin de réduire les sources de porosités. L'analyse de la composition révèle une forte proportion de cupules dans la phase cuivre, ce qui confère au mandrin une bonne résistance à la fragilité. L'analyse des surfaces de rupture offre une perspective microscopique sur les modes de défaillance des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des mécanismes de l'outil grâce à des études morphologiques et à l'amélioration de la durabilité du rivetage.

5.1.5 Vérification supplémentaire de la résistance à la flexion sur les propriétés mécaniques des mandrins de rivets en alliage de tungstène

La résistance à la flexion des mandrins de rivetage en alliage de tungstène est principalement déterminée par des essais de flexion trois ou quatre points. Cette vérification permet d'évaluer la capacité portante et le comportement à la déformation du mandrin sous charges latérales, fournissant ainsi des informations complémentaires sur sa stabilité latérale dans les supports de rivetage. L'éprouvette est une bande rectangulaire découpée dans le mandrin, avec des faces d'extrémité parallèles. Une charge de flexion est appliquée par la machine d'essai, qui enregistre la flèche et la charge de rupture. Chimiquement, le squelette de particules de tungstène résiste à la contrainte de flexion, tandis que la phase liante coordonne la tension superficielle et la compression, empêchant une rupture prématurée. La courbe de flexion présente une déformation plastique après la phase élastique. La structure biphasée du mandrin se traduit par un long plateau sur la courbe, témoignant d'une bonne ténacité avant rupture.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La distribution des contraintes a été analysée lors du processus de vérification. Lors de la flexion, la couche neutre du mandrin s'est légèrement déplacée et le gradient de contrainte de surface était faible. Après la rupture, le trajet de la fissure a été observé, s'étendant le long de la phase liante, avec des particules de tungstène faisant office de pont et retardant sa propagation. Le traitement thermique a confirmé cet effet : le recuit a amélioré l'allongement en flexion et la flexibilité du mandrin. Des différences de composition ont été mises en évidence : le système nickel-cuivre a présenté une résistance à la flexion équilibrée, tandis que le système nickel-fer a présenté une résistance plus élevée mais une flexibilité légèrement inférieure.

L'essai de résistance à la flexion confirme les performances axiales du mandrin, sa structure en forme de tige simulant un impact latéral. Cette validation oriente le processus : la résistance à la flexion reste stable après frittage et densification, et la résistance à la flexion externe augmente après travail à chaud et fibrage. La pureté chimique influe sur la validation, les impuretés réduisant la résistance. La validation de la résistance à la flexion du mandrin apporte un éclairage expérimental sur la réponse latérale, contribuant à la compréhension mécanique de l'outil par l'analyse des courbes et des surfaces de rupture, et fournissant une base de validation pour la conception des rivets.

5.2 Ténacité et comportement en fatigue des têtes de rivets en alliage de tungstène

Les propriétés mécaniques des mandrins de rivets en alliage de tungstène sont des aspects essentiels de leur conception. Ce comportement, qui se manifeste sous l'effet d'impacts répétés et de charges cycliques, contribue à la stabilité du support à long terme et prévient les ruptures soudaines. La ténacité comprend la résilience et la résistance à la rupture, tandis que la résistance à la fatigue se concentre sur l'accumulation des dommages et la durée de vie. La structure biphasée des alliages de tungstène confère ces propriétés : les particules de tungstène forment une barrière rigide, tandis que la phase liante absorbe l'énergie et coordonne la déformation. La ténacité empêche la rupture fragile du mandrin lors de l'impact du rivet, tandis que la résistance à la fatigue permet une utilisation à haute fréquence.

Les mécanismes comportementaux se manifestent par des dommages microscopiques : maillage de la phase liante lors de l'impact et formation de bandes persistantes due à l'accumulation de dislocations pendant les cycles de fatigue. Le traitement thermique optimise ce comportement ; le recuit relâche les contraintes et améliore la ténacité, tandis que le vieillissement des broches provoque des précipités qui renforcent la résistance à la fatigue. Les ajustements de composition influencent le comportement, ce qui se traduit par une bonne ténacité dans le système nickel-cuivre et une résistance à la fatigue élevée dans le système nickel-fer. Les essais comportementaux orientent les applications : les essais d'impact évaluent l'absorption d'énergie et les essais de fatigue simulent la durée de vie cyclique. Les mandrins de rivetage en alliage de tungstène utilisés dans les outils de rivetage démontrent durabilité et fiabilité, avec une déformation minimale du mandrin et une qualité de connexion stable. En pratique, le comportement est adapté aux conditions de travail ; les mandrins à haute ténacité sont utilisés dans les environnements vibrants, tandis que les mandrins résistants à la fatigue conviennent à un fonctionnement continu. La ténacité et le comportement en fatigue des mandrins en alliage de tungstène reflètent la réponse dynamique des matériaux composites, et l'optimisation du comportement contribue à prolonger la durée de vie des outils, garantissant des performances fiables lors de l'assemblage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2.1 Effet de la ténacité à l'impact sur la durabilité des mandrins de rivets en alliage de tungstène

La ténacité à l'impact des mandrins de rivetage en alliage de tungstène contribue principalement à leur capacité d'absorption d'énergie instantanée et de résistance aux dommages soudains. Cet effet est mis en évidence lors des impacts du marteau de rivetage, permettant au mandrin de conserver son intégrité structurelle et d'assurer la continuité du support. La ténacité à l'impact est évaluée par des essais de résilience Charpy ou de chute de marteau. L'échantillon de mandrin présente une forte absorption d'énergie au niveau de l'entaille : la phase de liaison chimique s'étend et pont la fissure, tandis que les particules de tungstène bloquent la propagation de celle-ci. Ce mécanisme repose sur une synergie biphasique : le squelette rigide en tungstène absorbe une partie de l'énergie cinétique, tandis que la phase de liaison se déforme plastiquement et absorbe le reste, empêchant ainsi la rupture fragile.

Le processus d'impact se divise en plusieurs étapes : absorption élastique initiale, déformation plastique intermédiaire et propagation lente des fissures finales. Le traitement thermique renforce cet effet ; le recuit affine le grain et accroît la ténacité, tandis que la précipitation due au vieillissement consolide les joints de grains. La composition joue également un rôle ; la présence d'une phase de cuivre contribue à une bonne ténacité et assure une déformation coordonnée sous l'effet de l'impact du mandrin. La ténacité à l'impact détermine la durabilité des mandrins lors du rivetage à haute fréquence, garantissant une bonne absorption d'énergie et une longue durée de vie. Elle assure la résistance du matériau aux charges dynamiques, favorise l'adaptation de l'outil à l'impact grâce à un mécanisme d'absorption et contribue à la durabilité des opérations de rivetage.

5.2.2 Application de l'analyse de fatigue cyclique aux têtes de rivets en alliage de tungstène

L'analyse de la fatigue cyclique des mandrins de rivetage en alliage de tungstène consiste principalement à simuler l'accumulation des dommages et le comportement à la rupture sous chargements répétés. Cette analyse permet de comprendre la durabilité du mandrin dans des environnements de rivetage à haute fréquence et d'optimiser les matériaux afin d'améliorer sa durée de vie globale. L'analyse de la fatigue cyclique utilise généralement des essais de flexion rotative ou de traction/compression axiale, en soumettant l'échantillon de mandrin à un champ de contraintes périodique et en enregistrant le nombre de cycles et l'évolution des dommages. Chimiquement, la phase liante coordonne les micro-contraintes pendant les cycles, tandis que le squelette de particules de tungstène résiste à la propagation des fissures de fatigue. Le processus d'analyse se déroule par étapes : on évalue d'abord un seuil de contrainte faible, puis on observe l'accélération des dommages sous contrainte élevée. La structure biphasée du mandrin se traduit par une courbe de fatigue en forme de S plus lisse, avec un amorçage des dommages en surface ou à l'interface.

En pratique, l'analyse de la fatigue cyclique révèle le mécanisme de fatigue du mandrin. Initialement, l'accumulation de dislocations forme une bande persistante ; en phase intermédiaire, des microfissures s'amorcent dans la phase liante ; et en phase finale, la propagation à travers les particules de tungstène conduit à la rupture. L'optimisation du traitement thermique lors de l'analyse montre que le recuit réduit les contraintes résiduelles et augmente le seuil de fatigue. Les différences de composition indiquent que le système nickel-cuivre présente une bonne ténacité à la fatigue mais des trajectoires de fissures de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

flexion sous chargement cyclique ; le système nickel-fer a une résistance élevée mais est légèrement plus sensible à la fatigue. L'analyse guide la conception du mandrin ; le polissage de surface réduit les points d'amorçage, ce qui permet d'obtenir des mandrins à forte résistance au chargement cyclique.

L'analyse de la fatigue cyclique intègre également l'observation des surfaces de rupture, la microscopie électronique à balayage révélant les stries de fatigue et les plans de clivage. L'analyse des chemins d'endommagement du mandrin optimise la microstructure. L'analyse du contrôle de la déformation évalue la fatigue oligocyclique, révélant une déformation minimale du mandrin et une longue durée de vie en rivetage haute fréquence. Les facteurs environnementaux sont pris en compte dans l'analyse : les milieux corrosifs accélèrent la fatigue, tandis que le revêtement du mandrin assure sa protection. L'application de l'analyse de la fatigue cyclique aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène offre une perspective expérimentale pour la prédiction de la durée de vie, contribue à l'optimisation de la durabilité des outils par l'étude des dommages et favorise la compréhension des mécanismes de rivetage.

L'analyse systématique garantit une fatigue homogène d'un lot de mandrins à l'autre, permettant d'ajuster les paramètres de frittage en fonction des retours de production. Le comportement en fatigue des alliages de tungstène est caractérisé par une synergie de phases : la phase liante absorbe l'énergie cyclique, tandis que la phase tungstène prévient la fissuration. Les applications s'étendent aux logiciels de simulation, où l'analyse par éléments finis prédit les zones critiques de fatigue et l'optimisation de la forme du mandrin réduit la concentration des contraintes. L'analyse de la fatigue cyclique des mandrins à rivets en alliage de tungstène fournit une évaluation dynamique pour l'ingénierie des matériaux, permettant une gestion optimale de la durée de vie des outils grâce à l'analyse de la réponse cyclique et démontrant son intérêt pratique dans le domaine de l'assemblage.

5.2.3 Méthode de mesure de la ténacité à la rupture des mandrins de rivets en alliage de tungstène

La ténacité à la rupture des mandrins de rivets en alliage de tungstène est principalement mesurée par des essais de flexion trois points ou des essais de traction compacte sur des échantillons pré-fissurés. Cette méthode permet d'évaluer la résistance du mandrin à la propagation des fissures en présence de celles-ci, et d'orienter ainsi le choix de la résistance à la rupture du matériau pour les supports soumis à des chocs. L'échantillon d'essai est une bande ou un disque rectangulaire découpé dans le mandrin, une pré-fissure y étant introduite pour simuler un dommage réel. Des charges de flexion ou de traction sont appliquées à l'aide d'une machine d'essai, et la courbe de propagation de la fissure est enregistrée. La phase chimiquement liée assure la continuité de la fissure, tandis que les particules de tungstène bloquent son passage. La courbe présente le pic de charge et le segment de propagation stable.

Le processus de mesure comprend la préparation de la fissure, des cycles de fatigue ou l'entaille pour introduire une fissure en pointe, et un mandrin à structure biphasée pour amorcer la fissure dans la phase liante. Les essais de flexion consistent à fixer l'échantillon à ses deux extrémités et à appliquer une charge en son centre ; le déplacement d'ouverture de la fissure est mesuré afin de calculer les paramètres de ténacité. Une méthode de traction compacte consiste à étirer les deux extrémités de l'échantillon, des brides fixant la zone de la fissure ; lorsque le mandrin présente une bonne ténacité, la propagation de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fissure est lente. L'environnement d'essai est à température ambiante contrôlée ; des variantes à haute température sont utilisées pour évaluer la ténacité à la rupture thermique.

Les méthodes de mesure de la ténacité à la rupture révèlent le mécanisme de la tige de poussée : les fissures se propagent le long de la phase liante, et la formation de cavités dans les grains de tungstène retarde leur propagation. Les mesures de traitement thermique montrent que le recuit améliore la ténacité et que le chemin de rupture de la tige de poussée devient plus fléchissant. Les différences de composition révèlent que le système nickel-cuivre présente une ténacité élevée et un meilleur pontage des fissures ; le système nickel-fer présente une résistance élevée mais une ténacité modérée. Les mesures orientent le processus : le frittage densifie la structure, ce qui confère une ténacité stable ; le travail à chaud et le traitement de fibrage augmentent la ténacité en flexion.

La mesure de la ténacité à la rupture des mandrins de rivetage en alliage de tungstène offre une perspective expérimentale sur la résistance à la fissuration, contribue à la compréhension de la ténacité des outils grâce à une analyse approfondie et fournit une base d'évaluation pour la conception des rivets. L'application systématique de cette mesure garantit une ténacité constante d'un lot de mandrins à l'autre, permettant ainsi des ajustements de paramètres basés sur le retour d'expérience de la production. Le comportement à la rupture des alliages de tungstène est mis en évidence par la mesure comme une synergie de phases : la phase liante assure le pontage énergétique tandis que la phase tungstène freine la propagation. Les applications sont étendues aux logiciels de simulation, l'analyse par éléments finis permettant de prédire les zones de forte ténacité et l'optimisation de la forme du mandrin réduisant la susceptibilité à la fissuration. L'évaluation des mandrins de rivetage en alliage de tungstène par la mesure de la ténacité à la rupture fournit une évaluation des dommages pour l'ingénierie des matériaux, permet la gestion de la ténacité des outils grâce à la réponse de la mesure et démontre sa valeur pratique dans le domaine de l'assemblage. La profondeur de l'analyse rend la ténacité du mandrin prévisible sous des conditions de charge élevée, favorisant ainsi une sécurité d'utilisation accrue.

5.2.4 Prédiction de la durée de vie des mandrins de rivets en alliage de tungstène sous l'effet de la fatigue à grand nombre de cycles

L'influence de la fatigue à grand nombre de cycles sur la durée de vie des mandrins de rivetage en alliage de tungstène est principalement étudiée à l'aide des courbes S-N et des modèles d'accumulation des dommages. Cette prédiction permet d'analyser la durabilité du mandrin sous faible contrainte et chargement cyclique élevé, et d'orienter l'évaluation de la durée de vie de l'outil dans les environnements de rivetage à haute fréquence. La fatigue à grand nombre de cycles se caractérise par une contrainte inférieure à la limite d'élasticité, mais un nombre de cycles élevé. Des échantillons de mandrin sont testés sur des machines de flexion rotative ou de traction/compression axiale, et le nombre de cycles ainsi que le comportement à la rupture sont enregistrés. La phase liante coordonne les micro-dommages lors de la fatigue à grand nombre de cycles, tandis que le squelette de particules de tungstène résiste à la propagation des fissures.

La méthode de prédiction consiste à tracer les courbes S-N et à tester la durée de vie sous différents niveaux de contrainte. La structure biphasée du mandrin induit une pente de courbe plus douce et une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

limite de fatigue plus élevée. Les modèles d'accumulation de dommages, tels que la règle de Miner, intègrent les charges variables pour prédire la durée de vie en conditions réelles d'utilisation. La prédiction de la fatigue à grand nombre de cycles du mandrin tient compte de l'état de surface ; le polissage réduit le point de départ et prolonge la durée de vie. Le traitement thermique est également pris en compte dans le processus de prédiction ; le recuit réduit les contraintes résiduelles et augmente la limite de fatigue.

La prédiction de la fatigue à grand nombre de cycles révèle le mécanisme de rupture par la barre supérieure : les micro-dommages débutent par une accumulation de dislocations, suivie de l'amorçage et de la propagation de fissures aux joints de grains, jusqu'à la rupture. Les différences de composition dans les prédictions montrent que le système nickel-cuivre présente une bonne ténacité à grand nombre de cycles et une faible dégradation sous cyclage ; les systèmes nickel-fer offrent une résistance élevée mais des limites de fatigue modérées. Les recommandations prédictives s'appliquent aux applications : le rivetage manuel privilégie la résistance à l'oligodendrammage, tandis que les systèmes pneumatiques haute fréquence privilégient la durée de vie en fatigue à grand nombre de cycles. La gestion de la pureté chimique minimise les impuretés et réduit l'amorçage des dommages à grand nombre de cycles.

L'analyse offre une perspective mathématique sur la réponse cyclique pour prédire la durée de vie des mandrins de rivetage en alliage de tungstène. L'analyse du modèle contribue à la compréhension de la durée de vie de l'outil et fournit une base prédictive pour la conception du rivetage. L'application systématique des prédictions garantit une durée de vie homogène des lots de mandrins, permettant un retour d'information sur la production pour l'ajustement des paramètres de frittage. Le comportement en fatigue à grand nombre de cycles des alliages de tungstène se reflète dans la prédiction comme un effet synergique : la phase liante absorbe l'énergie cyclique tandis que la phase tungstène prévient les dommages. La prédiction de la fatigue à grand nombre de cycles fournit un modèle dynamique pour évaluer la durée de vie des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, permettant une gestion de la durée de vie de l'outil grâce à la prédiction de la réponse et démontrant une valeur pratique en assemblage. La profondeur de l'analyse permet de prédire la durée de vie des mandrins en fonctionnement continu, optimisant ainsi les plans de maintenance.

5.3 Caractéristiques de frottement et d'usure des têtes de rivets en alliage de tungstène

Les caractéristiques des mandrins à rivets en alliage de tungstène dépendent principalement de l'interaction entre leur surface et la queue du rivet. Ces caractéristiques influencent le taux d'endommagement de la surface et la durabilité globale du mandrin lors du rivetage. Les caractéristiques de frottement sont liées à la résistance au glissement entre les surfaces de contact, tandis que les caractéristiques d'usure décrivent le processus d'enlèvement de matière. La structure biphasée des alliages de tungstène confère à la surface une faible friction et une phase dure qui résiste aux rayures lors d'une usure lente. L'analyse de ces caractéristiques permet d'optimiser la stabilité du mandrin lors d'utilisations répétées et de réduire l'accumulation de piqûres en surface.

Le mécanisme de frottement et d'usure se manifeste sur la surface de travail du mandrin. La dureté élevée des particules de tungstène réduit l'usure interne, tandis que la ténacité de la phase liante diminue

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'adhérence. Le frottement augmente lors de la formation d'une couche d'oxyde chimique en surface, et ses propriétés s'améliorent après polissage. Les essais de caractérisation orientent le choix des matériaux ; un faible coefficient de frottement garantit une déformation régulière du rivet, ce qui se traduit par un faible taux d'usure et une longue durée de vie. Les caractéristiques de frottement et d'usure des mandrins à rivets en alliage de tungstène reflètent la réponse de surface des matériaux composites. La maîtrise de ces caractéristiques contribue à la durabilité de l'outil et assure une base solide pour la pratique du rivetage.

5.3.1 Optimisation de la tige supérieure du rivet en alliage de tungstène basée sur la mesure du coefficient de frottement

Le coefficient de frottement des mandrins à rivets en alliage de tungstène est principalement mesuré par essai de frottement par glissement. Cette mesure permet d'évaluer la résistance de la surface du mandrin au contact du rivet, et d'orienter le traitement de surface et l'ajustement de la composition afin de réduire le frottement et d'améliorer l'efficacité du rivetage. Un tribomètre à disque ou à bille est généralement utilisé. L'échantillon de mandrin est fixé comme un disque, et une charge est appliquée sur le poinçon de polissage qui glisse. Le rapport entre la force de frottement et la force normale est enregistré. Le coefficient d'influence du mouillage sélectif est mesuré chimiquement et s'avère faible après polissage.

Les courbes de mesure de l'analyse de procédé ont été optimisées. Un lubrifiant a été ajouté lorsque le coefficient de frottement à sec était élevé, et l'effet d'un liquide de refroidissement a été testé lors du frottement humide. La phase tungstène de la broche d'éjection présente une dureté élevée et un faible coefficient ; une proportion plus importante de la phase liante améliore la plasticité et stabilise le frottement. Les variations de mesure incluaient le frottement à haute température, simulant les conditions de rivetage à chaud, et l'augmentation du coefficient lors de la formation de la couche d'oxyde sur la broche d'éjection, phénomène atténué par un revêtement protecteur. L'application de la mesure du coefficient de frottement pour l'optimisation de la broche d'éjection se traduit par un meilleur contrôle de la production : lorsque le coefficient est élevé, la texture de surface est ajustée et le tréfilage réduit le frottement miroir.

L'analyse de la composition de guidage révèle que la phase cuivre présente un coefficient de frottement élevé et un coefficient de frottement faible, ce qui permet une déformation plus régulière du mandrin. Les variations de ce coefficient après traitement thermique indiquent une surface de frottement propre et stable après recuit. La mesure du coefficient de frottement offre une approche quantitative pour optimiser l'interaction de surface des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, facilite le contrôle du frottement de l'outil par l'analyse du rapport des forces et contribue à l'amélioration de l'efficacité des opérations de rivetage.

5.3.2 Discussion sur le mécanisme d'usure des barres supérieures de rivets en alliage de tungstène

L'étude des mécanismes d'usure des mandrins de rivets en alliage de tungstène porte principalement sur l'usure adhésive, l'usure abrasive et l'usure par fatigue. Ces recherches contribuent à la compréhension du processus d'enlèvement de matière sur la surface de travail du mandrin sous contact avec le rivet, et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

permettent d'orienter la conception et la maintenance des pièces résistantes à l'usure. L'usure adhésive résulte du ramollissement et du transfert de la phase liante vers le rivet lors d'un contact à haute température, suivis d'une réaction chimique interfaciale formant une couche adhésive, ce qui entraîne l'accumulation de piquûres sur la surface du mandrin. L'usure abrasive se manifeste dans les rivets durs, où les particules incrustées rayent la phase tungstène, provoquant la formation de rainures sur la surface du mandrin.

L'usure par fatigue se manifeste sous l'effet d'impacts répétés, les micro-vibrations induisant un décollement de la couche superficielle et la propagation de fissures de fatigue dans la phase collée du mandrin. L'étude du mécanisme a été menée par des simulations d'essais d'usure, l'enregistrement de la perte de volume sous charge et en conditions de glissement à l'aide d'un tribomètre à disque et l'observation de la morphologie par microscopie électronique à balayage. Une usure par oxydation chimique a été observée, accompagnée d'une élimination accélérée de la couche superficielle due à la porosité. Ces résultats orientent l'optimisation, notamment par durcissement superficiel pour réduire l'adhérence, par revêtement pour protéger contre les particules abrasives et par traitement thermique pour améliorer la résistance à la fatigue. L'étude du mécanisme d'usure des mandrins de rivets en alliage de tungstène permet une meilleure compréhension du cheminement des dommages, contribue à l'amélioration de la résistance à l'usure des outils par une analyse de type et apporte des connaissances mécanistiques précieuses pour la pratique du rivetage.

5.3.3 Analyse de l'usure abrasive sur les dommages de surface des tiges de rivets en alliage de tungstène

L'usure abrasive des mandrins de rivetage en alliage de tungstène est principalement due aux effets de coupe et de rayure des particules dures lors du contact. Cette analyse permet de comprendre le mécanisme d'altération de la surface du mandrin lors du rivetage de rivets durs ou dans des environnements contenant des impuretés. L'usure abrasive provient de l'incrustation de résidus ou de fragments de rivets dans la surface de travail du mandrin. Lors de leur mouvement relatif, les particules creusent des sillons ou micro-entaillent la surface. Chimiquement, les particules de tungstène présentent une dureté élevée et résistent à la coupe, tandis que la phase de liaison est relativement tendre et forme facilement des sillons. Aux premiers stades de l'endommagement, de fines rayures apparaissent, puis, avec la poursuite de l'action, les sillons s'approfondissent et la rugosité de surface augmente.

Le processus d'analyse a été simulé par des essais d'usure, au cours desquels l'échantillon de tige de poussée a glissé contre un milieu abrasif, enregistrant la perte de volume et les modifications morphologiques. La microscopie électronique à balayage (MEB) a permis d'observer la morphologie des rainures ; la surface de la phase tungstène présentait des rayures superficielles, tandis que la phase liante présentait des sillons profonds. Le mécanisme d'endommagement a été décomposé en plusieurs étapes : un micro-usinage initial entraînant l'enlèvement d'une faible quantité de matière, un écaillage par fatigue à un stade intermédiaire, puis une accumulation de rainures affectant l'adhérence. L'analyse du traitement thermique a révélé l'influence de ce dernier ; le recuit a amélioré la ténacité de la phase liante, réduisant l'écaillage, tandis que le durcissement structural a diminué la profondeur des rainures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'analyse de l'usure abrasive prend également en compte les conditions de travail : le rivetage à grande vitesse engendre une énergie cinétique abrasive élevée et des dommages rapides, tandis que le frottement continu à basse vitesse provoque la formation de longues rainures. L'analyse du traitement de surface est également importante ; les revêtements ou les couches durcies protègent le mandrin des particules abrasives, ralentissant ainsi son endommagement. La gestion de la pureté chimique minimise les impuretés et réduit la production de particules abrasives. L'analyse de l'usure abrasive sur les dommages de surface des mandrins de rivetage en alliage de tungstène fournit une réponse du matériau à l'environnement de frottement, et les études morphologiques contribuent à l'optimisation de la résistance à l'usure des outils, permettant ainsi une meilleure compréhension des dommages lors du rivetage.

5.3.4 Comportement lors du processus de contact de la riveteuse en alliage de tungstène

L'usure par adhérence lors du contact avec les mandrins de rivets en alliage de tungstène résulte principalement du transfert de matière en surface sous haute température ou haute pression. Ceci induit une adhérence localisée entre le mandrin et la queue du rivet, affectant la séparation et l'intégrité de la surface. L'usure par adhérence provient du ramollissement instantané à haute température de la surface de contact. Chimiquement, la phase liante, dont le point de fusion est plus bas, ramollit en premier, formant des micro-soudures avec le matériau du rivet. Lors du glissement relatif, ces soudures se rompent, transférant de la matière sur la face opposée. Initialement, cela se manifeste par des aspérités en surface ; avec la poursuite du frottement, des piqûres ou des protubérances se forment, altérant l'état de surface de la zone de travail du mandrin.

Le mécanisme se manifeste à l'interface : l'accumulation de chaleur par frottement entraîne une élévation localisée de la température, provoquant l'écoulement de la phase liante et son adhésion au rivet ; lors du refroidissement, le point de liaison se solidifie. Une rupture par cisaillement se produit à ce point, entraînant le détachement du matériau du mandrin ou son adhérence au rivet. La dureté élevée des particules de tungstène réduit l'amorçage de l'adhésion et diminue la tendance à l'adhérence du mandrin. La conductivité thermique élevée induit une diffusion thermique rapide, une chute de température rapide au point de liaison et un transfert thermique réduit.

L'usure par adhérence est également influencée par la charge ; une pression élevée induit un contact étroit et une forte adhérence, tandis qu'une pression faible favorise le décollement. Les traitements de surface jouent également un rôle ; le polissage réduit l'adhérence initiale, et les revêtements isolent et limitent les réactions. Une bonne stabilité chimique est également importante ; une fine couche d'oxyde sur le mandrin ralentit l'adhérence. Le comportement à l'usure par adhérence des mandrins de rivets en alliage de tungstène lors du contact reflète l'interaction des matériaux pendant le frottement à haute température. L'analyse du transfert contribue à la gestion de surface de l'outil et fournit une référence de performance pour les opérations de rivetage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 6 Corrosion et durabilité des goupilles de rivet en alliage de tungstène

6.1 Comportement à la corrosion électrochimique des têtes de rivets en alliage de tungstène

Les mandrins de rivets en alliage de tungstène sont principalement sensibles à leur structure biphasée et au milieu environnant. Ce comportement est particulièrement marqué en milieu humide ou chimiquement nettoyé, affectant la stabilité de surface et la durabilité du mandrin. La corrosion électrochimique implique une dissolution anodique et une réduction cathodique. La phase tungstène est chimiquement inerte, tandis que les phases de liant, telles que le nickel ou le cuivre, sont très réactives et constituent facilement des sites d'amorçage de la corrosion. Une analyse comportementale a été réalisée à l'aide de courbes de polarisation et de spectroscopie d'impédance. Le balayage du potentiel du mandrin dans l'électrolyte a révélé des variations du potentiel de corrosion et de la densité de courant.

Le comportement à la corrosion inclut la formation de piqûres et une corrosion uniforme ; la phase liante se dissout préférentiellement pour former des microcellules, et la corrosion est lente après l'exposition des particules de tungstène. Le matériau présente une bonne stabilité chimique, s'autopassivant à l'air et formant une fine couche protectrice en surface. L'environnement influence ce comportement : les milieux acides accélèrent la dissolution de la phase liante, tandis que les milieux neutres ou alcalins sont relativement peu agressifs. Le comportement électrochimique à la corrosion des mandrins de rivetage en alliage de tungstène reflète la réponse électrochimique des matériaux composites. Cette étude comportementale contribue à l'optimisation de la résistance à la corrosion des outils et fournit une référence pour l'adaptation environnementale de la maintenance des rivets.

6.1.1 Application des courbes de polarisation à l'étude de la corrosion des mandrins de rivets en alliage de tungstène

L'application des courbes de polarisation à l'étude de la corrosion des mandrins de rivets en alliage de tungstène est principalement réalisée par balayage dynamique du potentiel. Cette méthode permet d'évaluer le potentiel de corrosion, le domaine de passivation et la densité de courant de corrosion du mandrin dans l'électrolyte, orientant ainsi l'amélioration de sa résistance à la corrosion. Le test utilise l'échantillon de mandrin comme électrode de travail, immergé dans un milieu simulé au sein d'un système à trois électrodes. Le balayage du potentiel enregistre la réponse en courant ; chimiquement, la branche anodique reflète le comportement de dissolution et la branche cathodique le processus de réduction. Les courbes montrent le potentiel de corrosion et le plateau de passivation, avec un courant accru dans la région active de la phase liante et un faible courant de passivation dans la phase tungstène.

Au cours du processus, les surfaces des échantillons ont été polies uniformément et l'environnement a été simulé à l'aide de solutions de chlorure de sodium ou d'acide sulfurique. Les courbes de polarisation ont permis de différencier les types de corrosion ; une sensibilité élevée a été observée lorsque le potentiel de claquage par piqûres était faible, et un large plateau a été observé après le revêtement de la tige supérieure. L'extrapolation de Tafel a été utilisée pour quantifier la vitesse de corrosion ; celle-ci augmentait lorsque la proportion de phase adhésive sur la tige supérieure était élevée. Un balayage dynamique a permis d'observer la repassivation, révélant une forte capacité de récupération de la tige

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

supérieure après endommagement. Les courbes de polarisation ont également servi à évaluer l'effet du traitement thermique dans cette étude. Le recuit a élargi la zone de passivation, ce qui a permis d'obtenir une meilleure résistance à la corrosion localisée du mandrin. Les différences de composition ont montré une passivation stable dans le système tungstène-cuivre, tandis que les propriétés magnétiques du nickel-fer n'ont pas influencé directement les courbes. La comparaison des courbes dans différents milieux a révélé que le mandrin se corrodait rapidement en milieu acide et présentait une forte passivation en milieu alcalin. L'utilisation des courbes de polarisation dans l'étude de la corrosion des mandrins de rivets en alliage de tungstène offre une perspective expérimentale sur les paramètres électrochimiques. L'analyse des courbes contribue à la compréhension de la résistance à la corrosion des outils et fournit une méthode d'évaluation pour la maintenance.

6.1.2 protège les barres supérieures de rivets en alliage de tungstène

La passivation des mandrins de rivets en alliage de tungstène est principalement obtenue par la formation de films d'oxyde spontanés ou artificiels en surface. Cette protection réduit la corrosion du mandrin en milieu humide ou en présence de produits de nettoyage, tout en préservant la régularité de sa surface et sa stabilité fonctionnelle. La couche de passivation se forme naturellement à l'air libre ou en milieu neutre, la phase tungstène formant une couche d'oxyde dense, le nickel ou le cuivre intervenant également comme liant. Chimiquement, cette fine couche bloque la diffusion de l'oxygène et la migration des ions. Le mécanisme de protection se manifeste électrochimiquement : la couche de passivation augmente le potentiel de corrosion et réduit le courant de l'anolyte.

Le processus de formation est influencé par l'environnement : la passivation est lente à l'air libre et l'épaississement est accéléré par traitement anodique électrochimique. Après polissage de la tige supérieure, la passivation est rapide, mais la couche superficielle rugueuse est poreuse et offre une protection limitée. Le traitement thermique favorise la formation de la couche de passivation, et le recuit contrôle la teneur en oxygène pour garantir l'uniformité de la couche inférieure. L'effet protecteur se traduit par une meilleure résistance à la corrosion par piqûres ; la couche de passivation possède un potentiel de rupture élevé et la tige supérieure subit moins de dommages localisés.

La couche de passivation protège le mandrin et lui confère une stabilité mécanique. Fine et résistante, elle adhère fortement et ne s'écaille pas lors du rivetage par friction. Après nettoyage chimique, elle se régénère, assurant ainsi une bonne durabilité du mandrin. Sa formation est influencée par sa composition : la couche de passivation à phase cuivre assure la conductivité électrique, tandis que la couche à phase nickel est dense. La protection du mandrin de rivet en alliage de tungstène par la couche de passivation démontre l'effet barrière de la chimie de surface, renforçant la résistance à la corrosion de l'outil grâce à la stabilité de la couche et garantissant une utilisation durable dans les environnements de rivetage.

6.1.2.1 Stabilité des barres supérieures de rivets en alliage de tungstène en milieu acide

des mandrins à rivets en alliage de tungstène en milieu acide est principalement influencée par le pH et la nature ionique du milieu. Cette stabilité est particulièrement manifeste dans les ateliers de nettoyage ou de traitement par brouillard acide, où le comportement de la couche de passivation à la surface du

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mandrin détermine la vitesse de corrosion. En milieu acide, la dissolution de la phase liante est activée et les éléments nickel ou cuivre forment facilement des ions solubles. Bien que la phase tungstène soit chimiquement relativement inerte, les micro-cellules à l'interface accélèrent la corrosion localisée. La stabilité globale du mandrin dépend de l'épaisseur de la couche de passivation ; une couche superficielle polie plus mince réduit légèrement la stabilité, tandis que l'érosion acide est ralentie après un traitement de placage ou de pré-passivation.

interaction biphasique : la phase liante réagit préférentiellement avec les ions hydrogène et les consomme ; après l'exposition des particules de tungstène, la couche d'oxyde superficielle se régénère ; et la morphologie de corrosion du mandrin tend à être uniforme plutôt que de présenter des piqûres profondes. Une concentration d'acide accrue diminue la stabilité, mais l'alliage de tungstène présente une stabilité relative dans les acides dilués, et la surface lisse du mandrin est maintenue durablement. Le traitement thermique influe sur la stabilité ; le recuit permet d'obtenir une microstructure uniforme mais ralentit la pénétration de l'acide. Des ajustements de composition améliorent la stabilité ; une phase cuivre plus riche favorise la conductivité mais accélère la dissolution de l'acide, tandis que la phase nickel offre une résistance légèrement supérieure à l'acide.

Il est possible de le restaurer par essuyage après immersion. Le traitement de surface améliore la stabilité ; la passivation chimique forme une couche épaisse, minimisant ainsi la corrosion sous brouillard acide. Des tests d'immersion évaluent la stabilité ; une variation minimale de la masse du mandrin indique une bonne résistance aux acides. La stabilité du mandrin à rivets en alliage de tungstène en milieu acide démontre l'adaptabilité du matériau composite aux différents milieux. La couche protectrice facilite l'entretien de la surface de l'outil, contribuant ainsi à sa durabilité lors d'opérations en milieu acide.

6.1.2.2 Réponse du mandrin à rivets en alliage de tungstène en milieu alcalin

En milieu alcalin, les mandrins de rivets en alliage de tungstène présentent principalement une passivation superficielle accrue et une légère dissolution. Ce comportement est observé lors de lavages ou de refroidissements alcalins, et le mandrin conserve une bonne stabilité globale. Le milieu alcalin favorise la formation d'oxydes stables à la surface du tungstène. Chimiquement, les phases liantes, nickel ou cuivre, sont peu solubles dans les alcalis, ce qui ralentit la corrosion du mandrin. Dans un premier temps, la couche de passivation superficielle s'épaissit, empêchant toute réaction ultérieure et préservant la régularité de la surface du mandrin. Ce mécanisme de réponse se manifeste par une sélectivité de phase : les particules de tungstène sont très inertes en milieu alcalin, la phase liante réagit légèrement pour former un précipité protecteur, et la couche superficielle du mandrin est dense. La réponse varie peu avec l'augmentation de la concentration en alcalis, et la surface du mandrin présente une corrosion uniforme plutôt que des piqûres. Le traitement thermique influence la réponse ; le recuit permet d'obtenir des joints de grains plus propres et une moindre pénétration des alcalis. Les différences de composition conduisent à une meilleure passivation de la phase nickel en milieu alcalin, tandis que la phase cuivre est légèrement plus active mais généralement stable.

La réaction de l'éjecteur en milieu alcalin est adaptée à la maintenance par lavage alcalin, et sa surface ne présente aucun dommage significatif après immersion. Un prétraitement de surface améliore cette

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

réaction, et une épaisse couche de passivation assure la stabilité de l'éjecteur sous brouillard alcalin . L'évaluation de la réaction par des tests d'immersion alcaline révèle une modification morphologique minimale , témoignant d'une bonne adaptabilité. La réaction de l'éjecteur de rivet en alliage de tungstène en milieu alcalin reflète l'adaptabilité du matériau à l'alcalinité, garantissant la tolérance au nettoyage de l'outil grâce à la passivation et offrant une base de surface adaptée aux opérations en milieu alcalin.

6.1.3 Caractérisation des mandrins de rivets en alliage de tungstène par mesure du potentiel de corrosion

La mesure du potentiel de corrosion des mandrins à rivets en alliage de tungstène est principalement réalisée par la méthode du potentiel en circuit ouvert et par balayage potentiodynamique . Cette caractérisation permet d'évaluer la stabilité thermodynamique du mandrin dans le milieu et d'orienter l'appréciation de sa résistance à la corrosion. L'échantillon de mandrin est immergé dans un électrolyte, et le potentiel stabilisé est enregistré. Chimiquement, un potentiel élevé indique une forte tendance à la passivation et une faible propension à l'amorçage de la corrosion. Le potentiel en circuit ouvert se stabilise avec le temps, et le potentiel de la structure biphasée du mandrin se situe entre celui du tungstène et celui de la phase liante.

Le processus de caractérisation a impliqué une comparaison multi-milieu ; un faible potentiel en milieu acide favorisait la corrosion, tandis qu'un potentiel élevé en milieu alcalin assurait une passivation stable. Le balayage dynamique du potentiel a permis d'étendre le processus de caractérisation, révélant que le point de courant nul correspond au potentiel de corrosion et que la tige de poussée présentait une large plage de passivation et une bonne résistance à la corrosion. L'état de surface a été mesuré comme facteur limitant ; le polissage induisait un potentiel élevé, tandis que la rugosité provoquait des fluctuations de potentiel. La caractérisation par traitement thermique a montré que le recuit augmentait le potentiel et permettait d'obtenir une microstructure plus uniforme.

La mesure du potentiel de corrosion caractérise l'adaptabilité des mandrins de rivetage en alliage de tungstène à diverses applications ; des potentiels plus élevés garantissent une meilleure stabilité des mandrins en milieu humide. Les différences de composition sont également prises en compte : les mandrins en tungstène-cuivre présentent des potentiels modérés, tandis que ceux en nickel-fer affichent des potentiels légèrement inférieurs, mais une passivation plus efficace. Ces mesures orientent les actions de protection ; des potentiels plus faibles améliorent les performances du revêtement. La mesure du potentiel de corrosion offre une perspective expérimentale sur la stabilité électrochimique des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, contribue à l'évaluation de la corrosion des outils par l'analyse du potentiel et fournit une base de caractérisation pour la durabilité environnementale.

6.1.4 Application de l'analyse par spectroscopie d'impédance à la cinétique de corrosion des mandrins de rivets en alliage de tungstène

L'application de la spectroscopie d'impédance à l'étude de la cinétique de corrosion des mandrins de rivets en alliage de tungstène repose principalement sur la mesure de l'impédance en courant alternatif (CA). Cette application permet de révéler les réactions interfaciales et les variations de la vitesse de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corrosion du mandrin dans l'électrolyte, guidant ainsi l'évaluation et l'amélioration de sa résistance à la corrosion. La spectroscopie d'impédance consiste à appliquer un faible signal CA, à enregistrer la courbe de réponse en fréquence et à ajuster un modèle de circuit équivalent. Chimiquement, la couche de passivation à la surface du mandrin se comporte comme un élément capacitif-résistif, et la dissolution de la phase liante correspond à la résistance de transfert. Lors de l'application, l'échantillon de mandrin sert d'électrode de travail, immergé dans un milieu simulé, et la fréquence est balayée des hautes aux basses fréquences. La forme en arc de la courbe reflète l'intégrité de la couche de passivation.

En pratique, l'analyse par spectroscopie d'impédance permet de distinguer les stades de corrosion : un arc initial important indique une passivation stable, tandis qu'un arc plus faible au fil du temps accélère la corrosion. La structure biphasée du mandrin est mise en évidence par l'analyse : la phase tungstène présente une impédance élevée et la phase liante est contrôlée par la diffusion à basse fréquence. L'ajustement par circuit équivalent paramétrise le processus, quantifiant le comportement interfacial via la résistance de l'électrolyte, la capacité de la double couche et la résistance de transfert, ce qui permet de déduire la cinétique de corrosion du mandrin. L'analyse guide le traitement thermique ; après recuit, l'arc d'impédance augmente, la microstructure devient plus uniforme et la résistance à la corrosion est améliorée. Selon la composition, le système tungstène-cuivre présente une impédance élevée et une passivation stable, tandis que le système nickel-fer a une impédance légèrement inférieure mais récupère plus rapidement.

L'analyse par spectroscopie d'impédance évalue également l'efficacité du traitement de surface ; la modification de la forme de l'arc après revêtement reflète l'apport de la couche protectrice. L'analyse de l'influence du milieu révèle qu'une faible impédance en milieu acide entraîne une corrosion rapide, tandis qu'un arc important en milieu alcalin favorise une passivation efficace. Les applications s'étendent à la surveillance dynamique ; la courbe d'impédance variable du mandrin après une immersion prolongée permet de prédire sa durée de vie. La gestion de la pureté chimique garantit une réduction des impuretés, ce qui se traduit par un arc d'impédance net et sans interférences. L'application de la spectroscopie d'impédance à l'étude de la cinétique de corrosion des mandrins de rivets en alliage de tungstène offre une perspective fréquentielle sur la dynamique interfaciale, contribue à la compréhension des mécanismes de corrosion des outils par ajustement de courbes et enrichit les méthodes analytiques d'évaluation de la durabilité environnementale.

6.1.5 Comportement à la corrosion par oxydation des barres supérieures de rivets en alliage de tungstène

L'oxydation des mandrins de rivets en alliage de tungstène est principalement due à des modifications de surface liées à l'oxygène présent dans l'atmosphère ou le milieu environnant. Ce phénomène se manifeste lorsque le mandrin est exposé à l'air ou à des températures élevées, affectant la stabilité de sa surface et sa durée de vie. La réaction d'oxydation débute par l'adsorption de molécules d'oxygène à la surface du mandrin. Les éléments de la phase liante, tels que le nickel ou le cuivre, s'oxydent en premier pour former une fine couche, tandis que la phase tungstène forme lentement des oxydes. La corrosion du mandrin tend à se modérer après la formation de la couche d'oxyde. Une couche épaisse entrave la diffusion de l'oxygène, mais la corrosion s'accélère si la couche est poreuse.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le mécanisme comportemental se manifeste par une sélectivité de phase : l'oxydation de la phase liante consomme préférentiellement l'oxygène, générant de l'oxyde de nickel ou de cuivre, tandis que l'oxydation de la phase tungstène forme une couche dense. Le comportement global du mandrin passe alors d'une oxydation rapide à une stabilité de passivation. Une température élevée accélère la réaction ; lorsque le mandrin est chauffé par friction, une épaisse couche d'oxyde se forme localement, entraînant des changements de couleur de surface. L'humidité du milieu participe à l'oxydation, rendant le phénomène plus actif en milieu humide, et la couche d'hydrate à la surface du mandrin accroît sa sensibilité à la corrosion. L'influence de la réaction d'oxydation sur le comportement à la corrosion du mandrin oriente la protection ; la prépassivation forme une couche uniforme, assurant un comportement plus stable. Comportement lié à la composition : la couche d'oxyde de cuivre est conductrice et favorise la corrosion, tandis que la couche de nickel est dense. Le traitement thermique influe sur le comportement ; le recuit permet d'obtenir une surface propre et une oxydation plus lente. Le comportement de corrosion de la réaction d'oxydation sur les mandrins de rivets en alliage de tungstène reflète un processus de surface interactif avec l'oxygène, soutenant l'évaluation de la résistance à la corrosion des outils par la formation de couches et fournissant des références comportementales dans la pratique de la maintenance.

6.1.6 Maîtrise des propriétés chimiques des têtes de rivets en alliage de tungstène

Les facteurs environnementaux influençant les propriétés chimiques des mandrins de rivets en alliage de tungstène sont principalement la température, l'humidité, le milieu et la composition atmosphérique. Cette influence affecte la vitesse de réaction de surface et la stabilité de la microstructure du mandrin, phénomènes qui se manifestent selon les conditions d'atelier ou de stockage. L'augmentation de la température régule la vitesse d'oxydation, activant chimiquement et thermiquement les collisions moléculaires et accélérant la formation de la couche d'oxyde à la surface du mandrin. Cependant, le point de fusion élevé du tungstène modère le comportement global. L'augmentation de l'humidité implique la présence de vapeur d'eau, et l'adsorption d'eau à la surface du mandrin favorise la formation d'hydroxydes, rendant le matériau plus sensible à la corrosion.

La régulation du milieu, notamment par les acides et les bases, module l'activité chimique : les acides dissolvent la phase liante, tandis que les bases stabilisent la couche de passivation et assurent une bonne résistance à la corrosion. La composition atmosphérique, en particulier la présence d'oxygène et d'azote, régule l'oxydation et la nitruration ; la tige est chimiquement stable à l'air pur, mais la corrosion est accélérée en milieu pollué. La lumière, et notamment les rayonnements ultraviolets, module les réactions photochimiques de surface, et les propriétés chimiques de la tige restent globalement inchangées lors du stockage en extérieur.

Les facteurs environnementaux, tels que les vibrations et les contraintes, influencent également les propriétés chimiques des mandrins de rivetage en alliage de tungstène. Les contraintes mécaniques, en exposant les fissures, accélèrent l'amorçage de la corrosion. Les mesures de protection, comme les revêtements, isolent le matériau de l'environnement et préservent ses propriétés chimiques initiales. La composition du matériau influe sur sa réponse à l'environnement : la conductivité élevée de la phase cuivre détermine le comportement électrochimique, tandis que la phase nickel détermine la résistance

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aux alcalis. L'influence des facteurs environnementaux sur les propriétés chimiques des mandrins de rivetage en alliage de tungstène reflète l'interaction du matériau avec les conditions extérieures. L'analyse factorielle permet d'adapter chimiquement l'outil et contribue au cadre réglementaire de son environnement d'utilisation.

6.2 Mécanisme d'oxydation à haute température des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

repose principalement sur l'interaction entre la surface et l'oxygène. Ce mécanisme se manifeste lorsque le mandrin est exposé à l'air chaud ou à un environnement de travail à haute température, affectant la stabilité de sa surface et sa durabilité globale. Le processus débute par l'adsorption de molécules d'oxygène sur la surface du mandrin. Chimiquement, les éléments liants tels que le nickel ou le fer se combinent d'abord à l'oxygène pour former des oxydes, suivis de l'oxydation lente du tungstène pour former une couche dense. Ce processus se déroule par étapes : à basse température, la diffusion contrôle la croissance lente de la couche d'oxyde, tandis qu'à haute température, la vitesse de réaction augmente, conduisant à une couche plus épaisse.

Le mécanisme principal repose sur la sélectivité de phase. La phase liante, très réactive, s'oxyde préférentiellement, formant une couche d'oxyde poreuse, tandis que la phase de tungstène, inerte, forme une couche d'oxyde de tungstène compacte. Le mécanisme global du mandrin passe d'une oxydation rapide à une autolimitation. La diffusion des éléments à l'interface participe à ce mécanisme : l'oxyde de la phase liante réagit avec le tungstène pour former une couche composite, ce qui entraîne un changement de couleur de la surface du mandrin. Le traitement thermique influence ce mécanisme ; après recuit, la microstructure est plus uniforme et les points d'amorçage de l'oxydation sont moins nombreux. Les différences de composition jouent également un rôle : dans le système tungstène-cuivre, la couche d'oxyde de cuivre est conductrice, tandis que dans le système tungstène-nickel, la couche de nickel est dense.

Le mécanisme d'oxydation à haute température inclut également la volatilisation : l'oxyde de tungstène se vaporise à haute température, emportant la couche superficielle et entraînant une perte progressive de masse du mandrin. Un mécanisme de contrôle de l'atmosphère protectrice intervient également : un gaz inerte réduit le contact avec l'oxygène, ce qui conduit à une couche d'oxyde plus mince sur le mandrin. L'analyse du mécanisme, par analyse thermogravimétrique pour observer les variations de masse, montre qu'une courbe d'oxydation plate indique une bonne durabilité. Le mécanisme d'oxydation à haute température des mandrins de rivets en alliage de tungstène reflète la réponse à l'oxygène des composites réfractaires, contribuant au maintien de la surface de l'outil par la formation d'une couche protectrice et fournissant une base mécanistique pour son fonctionnement en environnements thermiques.

6.2.1 Effet de la cinétique d'oxydation sur les tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

La cinétique d'oxydation des mandrins de rivets en alliage de tungstène se manifeste principalement par la régulation de la vitesse de réaction et du comportement de croissance des couches. Cette influence détermine le degré d'endommagement superficiel et la durabilité du mandrin sous exposition à haute température. La cinétique d'oxydation décrit la diffusion de l'oxygène et la vitesse de réaction. La phase

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

liante du mandrin présente une activité cinétique élevée, entraînant une formation rapide de la couche initiale, tandis que la phase tungstène a une cinétique lente et une croissance de couche auto-limitée. Le mécanisme en jeu est un contrôle par diffusion : l'oxygène migre vers l'intérieur à travers les interstices, sous l'effet d'un gradient de concentration chimique, et l'augmentation de l'épaisseur de la couche du mandrin ralentit avec le temps.

Les effets cinétiques incluent également la dépendance à la température : une augmentation de la température diminue l'énergie d'activation mais accélère la réaction ; à haute température, l'épaisseur de la couche capillaire augmente tandis que la passivation se stabilise. La cinétique de composition diffère : les phases de cuivre présentent une cinétique rapide, conduisant la chaleur et favorisant sa dissipation, tandis que les phases de nickel, plus denses, présentent une cinétique lente. La cinétique du traitement thermique joue également un rôle : le recuit permet d'obtenir des joints de grains plus propres et des chemins de diffusion plus courts, ce qui réduit les vitesses d'oxydation capillaire. La cinétique de l'état de surface régule l'oxydation : les surfaces polies présentent des vitesses d'oxydation initiales plus faibles, tandis que les surfaces rugueuses, avec davantage de sites actifs, présentent des vitesses plus élevées.

L'analyse d'impact de la cinétique d'oxydation, par ajustement de courbes thermogravimétriques, utilise des modèles cinétiques de mandrin linéaires ou paraboliques pour refléter le type de croissance de la couche. Cette influence oriente la protection, en modifiant la cinétique d'initiation des changements de revêtement et en améliorant la durabilité du mandrin. La cinétique d'oxydation des mandrins de rivets en alliage de tungstène démontre la réponse du matériau contrôlée par la vitesse, soutient l'évaluation de la durabilité de l'outil par l'analyse de diffusion et fournit une base cinétique pour le fonctionnement à chaud.

6.2.2 Application d'un revêtement protecteur sur les mandrins à rivets en alliage de tungstène

L'application de revêtements protecteurs sur les mandrins de rivets en alliage de tungstène consiste principalement à former une barrière par placage ou passivation. Ce traitement réduit l'oxydation et la corrosion de la surface du mandrin, préservant ainsi sa stabilité et sa durée de vie. Le revêtement bloque la diffusion de l'oxygène et du milieu environnant ; chimiquement, les couches de placage, telles que le nickel-phosphore ou le chrome-azote, adhèrent fortement au substrat, maintenant une surface lisse. Les procédés d'application comprennent la galvanoplastie ou le dépôt chimique en phase vapeur, et le revêtement adhère uniformément après polissage du mandrin.

Les avantages de cette application résident dans la protection sélective : le revêtement ralentit l'usure par frottement sur le mandrin résistant à l'usure et résiste à la corrosion en milieux corrosifs. Les revêtements de passivation sont auto-générés et la couche d'oxyde présente sur le mandrin s'épaissit à l'air libre pour protéger le substrat. Des différences de composition permettent d'obtenir des revêtements conducteurs (système tungstène-cuivre) et des revêtements à haute dureté (système tungstène-nickel). Un traitement thermique assure la stabilité du revêtement et un recuit garantit une forte adhérence.

L'application de revêtements protecteurs sur les mandrins permet également d'évaluer leur durabilité ; des tests d'adhérence vérifient la qualité du revêtement, qui ne se décolle pas même après des utilisations

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

répétées. Le revêtement comble les irrégularités de surface, ce qui réduit le coefficient de frottement du mandrin. Il présente une bonne stabilité chimique et ne génère pas de nouvelles sources de corrosion. L'application de revêtements protecteurs sur les mandrins de rivetage en alliage de tungstène constitue une stratégie de protection de surface optimisée, contribuant à la durabilité de l'outil grâce à un effet barrière et valorisant son utilisation en milieu opérationnel.

6.2.3 Dommages aux barres supérieures des rivets en alliage de tungstène causés par la formation d'oxydes volatils

La corrosion des mandrins de rivetage en alliage de tungstène due à la formation d'oxydes volatils se produit principalement dans des environnements à haute température. Cette corrosion résulte de la transformation instable de la couche d'oxyde superficielle, entraînant une perte progressive de matière et affectant la précision dimensionnelle et l'intégrité de surface du mandrin. Les oxydes volatils, tels que l'oxyde de tungstène, passent de l'état solide à l'état gazeux à haute température et s'échappent de la surface du mandrin. Chimiquement, ils subissent une réaction d'oxydation pour former de l'oxyde de tungstène, qui se volatilise ensuite sous l'effet de la chaleur, ce qui amincit la surface de travail et augmente sa rugosité. Le processus de corrosion débute par l'adsorption d'oxygène sur la surface du mandrin ; la phase liante s'oxyde en premier pour former la couche initiale, suivie de la phase tungstène, générant des produits de volatilisation.

Le mécanisme d'endommagement se manifeste par un gradient de température : la volatilisation est rapide dans les zones à haute température, et les oxydes de surface se vaporisent rapidement lorsque le frottement local génère de la chaleur dans le mandrin, accélérant l'enlèvement de matière et formant des piqures ou des irrégularités. Les oxydes volatils perturbent l'uniformité du mandrin, la volatilisation étant plus importante sur les bords et moindre au centre, ce qui entraîne une modification progressive de la forme du mandrin et une instabilité du support des rivets. La stabilité chimique influe également sur l'endommagement : la volatilisation est plus lente lorsque la couche d'oxyde du liant est dense, et accélérée lorsqu'elle est poreuse en raison de l'exposition au tungstène.

Les dommages causés par la formation d'oxydes volatils s'étendent à l'intérieur du mandrin. Après le décollement de la couche superficielle, la nouvelle couche s'oxyde, entraînant une perte de masse cumulative et une réduction de la durée de vie. Le comportement face aux dommages est modifié par le traitement thermique ; le recuit permet d'obtenir une microstructure plus uniforme et de réduire le nombre de points d'amorçage de la volatilisation. La composition joue un rôle dans les dommages ; une phase cuivre plus riche améliore la conductivité thermique et réduit la dissipation de chaleur, limitant ainsi la volatilisation ; la phase nickel forme des oxydes stables, freinant la volatilisation. L'analyse des dommages, par analyse thermogravimétrique (ATG), permet d'observer les variations de masse ; une courbe de volatilisation plate dans le mandrin indique une bonne durabilité. Les dommages subis par les mandrins de rivets en alliage de tungstène, causés par la formation d'oxydes volatils, reflètent la consommation de matière due aux réactions gaz-solide à haute température. L'écoulement du produit contribue à l'évaluation de la durée de vie de l'outil et fournit des informations sur les mécanismes d'endommagement en environnements chauds.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.4 Régulation de la résistance à l'oxydation des mandrins de rivets en alliage de tungstène par des éléments d'alliage

des mandrins à rivets en alliage de tungstène par des éléments d'alliage repose principalement sur la formation d'une couche d'oxyde stable ou sur l'ajustement de la cinétique de réaction. Cette régulation ralentit la dégradation de surface à haute température, préservant ainsi la régularité et la durabilité du matériau. Des éléments d'alliage tels que le nickel, le fer ou le cuivre participent au processus d'oxydation. Chimiquement, le nickel forme une couche d'oxyde de nickel dense, bloquant la diffusion de l'oxygène et améliorant la résistance à l'oxydation du mandrin. Le fer forme une couche composite d'oxyde de fer, régulant la vitesse d'oxydation et ralentissant le changement de couleur de la surface du mandrin. La phase cuivre régule la conductivité thermique, permettant une dissipation thermique rapide, réduisant les températures élevées localisées et retardant l'amorçage de l'oxydation.

Le mécanisme de régulation se manifeste par un effet synergique : la phase liante s'oxyde préférentiellement et consomme l'oxygène, générant une couche non volatile qui protège la phase de tungstène, ce qui confère au mandrin une forte résistance globale à l'oxydation. Le micro-dopage aux terres rares régule la purification des joints de grains, réduisant les points d'amorçage de l'oxydation et ralentissant l'épaississement de la couche du mandrin. Le traitement thermique régule la réponse, assurant une diffusion uniforme des éléments après recuit et une résistance à l'oxydation constante. Le rapport de composition régule la tendance à l'oxydation, ce qui permet d'obtenir une phase liante plus épaisse et plus multicouche pour une meilleure protection et une durabilité accrue du mandrin.

La régulation de la résistance à l'oxydation des mandrins par des éléments d'alliage a également été évaluée par traitement de surface. Le revêtement et les éléments forment de manière synergique une protection multicouche, aboutissant à une fine couche d'oxyde sur le mandrin. La stabilité chimique est ainsi assurée, l'oxydation sélective des éléments produisant des produits stables et minimisant la perte de masse du mandrin. L'analyse de cette régulation, par des tests d'oxydation observant l'épaisseur et la morphologie de la couche, a montré que la courbe de résistance à l'oxydation plate du mandrin témoigne d'une régulation efficace. La régulation de la résistance à l'oxydation des mandrins de rivets en alliage de tungstène par des éléments d'alliage illustre une stratégie de matériau basée sur l'optimisation de la composition. La formation de la couche contribue à la stabilité de surface de l'outil et permet une régulation optimale lors des opérations à chaud.

6.3 Test de durabilité environnementale de la barre supérieure de rivet en alliage de tungstène

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène sont principalement évalués pour leur maintien en performance dans des environnements humides ou corrosifs, en simulant des conditions telles que le brouillard salin et les cycles d'humidité. Ces essais permettent de comprendre la stabilité à long terme de la surface et de la structure globale du mandrin, orientant ainsi le choix des matériaux et les mesures de protection. Les méthodes d'essai comprennent le test au brouillard salin, qui simule les environnements marins ou de brouillard salin, et le test de cycles d'humidité, qui évalue les effets des variations de température et d'humidité. La structure biphasée des alliages de tungstène est mise en évidence par ces essais : la phase tungstène présente une forte résistance à la corrosion, tandis que la phase liante est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sensible aux ions chlorure ou à l'humidité. Des modifications de surface, une perte de masse et une dégradation des performances sont observées après exposition des échantillons, et l'analyse chimique des produits de corrosion révèle les mécanismes sous-jacents. L'importance des essais de durabilité environnementale réside dans la prédiction des performances des mandrins en conditions réelles d'utilisation en atelier ou de stockage en extérieur. Le test au brouillard salin accélère la corrosion par piqûres due aux ions chlorure, tandis que les cycles d'humidité induisent une corrosion sous contrainte. Les normes d'essai sont conformes aux spécifications industrielles, et les durées et conditions d'exposition sont adaptées aux scénarios d'application. Les résultats obtenus orientent les traitements de surface, les revêtements ou la passivation afin d'améliorer la durabilité. Les essais de durabilité environnementale des mandrins de rivetage en alliage de tungstène démontrent l'adaptabilité du matériau à des conditions complexes, permettent de prédire la durée de vie des outils par simulation expérimentale et fournissent des indications pratiques pour la maintenance des rivets.

6.3.1 Évaluation des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène par essai au brouillard salin

Le test de corrosion par brouillard salin des mandrins à rivets en alliage de tungstène consiste principalement à simuler un environnement de brouillard salin neutre ou acide, à exposer les échantillons de mandrin et à observer les modifications de la morphologie et de la vitesse de corrosion. Cette évaluation permet de déterminer la stabilité de surface et la durabilité des mandrins en milieu humide chloré. Lors du test, les mandrins sont placés dans une chambre de brouillard salin où du chlorure de sodium est pulvérisé. Chimiquement, les ions chlorure s'adsorbent à la surface, détruisant la couche de passivation, et la phase liante se dissout préférentiellement, formant une corrosion par piqûres ou une corrosion uniforme. Le processus d'évaluation enregistre les points de rouille superficielle, les piqûres et la perte de masse après le temps d'exposition. La phase tungstène du mandrin présente une forte résistance au chlore et la corrosion s'amorce dans la zone de la phase liante.

Le mécanisme d'évaluation se reflète dans les microcellules : la phase liante se dissout à l'extrémité galvanique anodique, la phase tungstène assure une protection cathodique, et bien que la partie supérieure de la tige présente une faible tendance à la corrosion par piqûres, les dommages localisés sont importants. L'efficacité du traitement de surface est évaluée : le revêtement présente une excellente résistance au brouillard salin et peu de produits de corrosion. L'impact du traitement thermique est évalué : le recuit permet d'obtenir une microstructure uniforme et une pénétration lente du chlore. Les différences de composition sont évaluées : le système tungstène-cuivre présente une réduction de la corrosion assistée par la conductivité, tandis que les propriétés magnétiques du système tungstène-nickel-fer n'affectent pas directement la corrosion, mais la liaison interfaciale régule sa propagation.

Les essais au brouillard salin permettent d'évaluer l'adéquation des mandrins aux applications en milieu marin. Les mandrins utilisés dans les ateliers maritimes exigent une résistance élevée au brouillard salin, tandis que ceux conformes aux normes environnementales générales sont suffisants. L'évaluation oriente la maintenance, en insistant sur le nettoyage régulier des mandrins sensibles au brouillard salin. L'analyse chimique des produits de corrosion et des types d'oxydes révèle les mécanismes sous-jacents. Les essais au brouillard salin offrent une perspective simulée de la corrosion accélérée par le chlore dans les mandrins de rivetage en alliage de tungstène, contribuant à la compréhension de la résistance des outils

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

au brouillard salin par l'observation morphologique et participant à l'évaluation de leur résistance dans les opérations en milieu humide.

6.3.2 Le rôle des cycles d'humidité dans la durabilité des mandrins de rivetage en alliage de tungstène

L'influence des cycles d'humidité sur la durabilité des mandrins de rivetage en alliage de tungstène se manifeste principalement par la simulation de la corrosion sous contrainte et de l'oxydation induites par l'alternance de températures et d'humidité. Cet effet permet d'évaluer les performances à long terme du mandrin dans des environnements à humidité variable et d'orienter les conditions de stockage et d'utilisation. Le processus de cyclage alterne entre forte humidité et haute température, puis faible humidité et basse température. Chimiquement, l'adsorption d'humidité en surface favorise l'oxydation, et les variations de température génèrent des contraintes thermiques, entraînant des dommages et des réparations répétés de la couche de passivation du mandrin. Ce mécanisme se manifeste par la condensation de la vapeur d'eau : en forte humidité, un film liquide se forme en surface, constituant un électrolyte, et la phase liante se dissout légèrement ; en faible humidité, les contraintes de séchage sont relâchées.

Les effets incluent également l'accumulation de fatigue, les micro-contraintes répétées lors des cycles et la lente propagation des micro-dommages à l'interface du mandrin. Les effets de surface sont significatifs : l'épaisseur de la couche d'oxyde augmente en milieu humide et des fissures apparaissent en milieu humide, réduisant progressivement la régularité de la surface du mandrin. Le traitement thermique a également un impact ; le recuit permet de réduire les contraintes et les dommages cycliques. Les différences de composition jouent aussi un rôle : la phase cuivre présente une conductivité thermique et une dissipation rapides, avec une influence minimale de l'humidité, tandis que la phase nickel assure la stabilité de la passivation et une bonne tolérance aux cycles.

Les cycles d'humidité permettent d'évaluer la durabilité des têtes de rivets en stockage. Celles destinées aux environnements tempérés ou tropicaux doivent présenter une grande adaptabilité à ces cycles. Cette étude oriente les mesures de protection, notamment l'emballage hermétique afin de réduire l'exposition à l'humidité. L'analyse chimique des produits après cycle et la distribution des oxydes révèlent le mécanisme sous-jacent. L'influence des cycles d'humidité sur la durabilité des têtes de rivets en alliage de tungstène offre une perspective de simulation des conditions humides, contribue à l'évaluation de la durée de vie des outils par l'analyse de leur réponse cyclique et définit les fondements de leur utilisation en stockage environnemental.

6.3.3 Intégration de la simulation multi-échelle dans les têtes de rivets en alliage de tungstène

L'intégration de simulations multi-échelles dans les mandrins de rivetage en alliage de tungstène combine principalement des modèles atomiques, microscopiques et macroscopiques. Cette intégration permet de prédire le comportement du mandrin sous des contraintes et des environnements complexes, guidant ainsi la conception des matériaux et l'optimisation de leurs performances. L'approche multi-échelle débute par des calculs de mécanique quantique des interactions élémentaires, suivis d'une analyse chimique de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'énergie de liaison entre le tungstène et la phase liante afin de déterminer les voies de diffusion. Elle s'étend ensuite à des simulations de dynamique moléculaire du mouvement des dislocations et des réponses des joints de grains, et enfin à des modèles macroscopiques par éléments finis pour évaluer la distribution des contraintes.

Le processus d'intégration révèle l'impact de la ségrégation des éléments d'alliage sur la résistance interfaciale à l'échelle atomique et prédit l'amorçage de microfissures dans la zone de concentration de contraintes du mandrin. La simulation de la dynamique des dislocations discrètes à l'échelle micrométrique lors de la déformation par impact clarifie le mécanisme de coordination biphasique du mandrin. Un modèle macroscopique continu intègre les paramètres microscopiques, permettant ainsi d'estimer la durée de vie en fatigue globale du mandrin. L'intégration des simulations est réalisée par transfert de paramètres : la simulation atomique fournit l'énergie de liaison aux entrées microscopiques, et les résultats microscopiques calibrent le modèle constitutif macroscopique.

Dans les applications, des simulations multi-échelles évaluent l'évolution des dommages subis par les mandrins lors du rivetage. Des facteurs environnementaux, tels que l'humidité, sont intégrés au modèle de corrosion afin de prédire la sensibilité des mandrins à la corrosion sous contrainte. L'optimisation et l'intégration de la composition permettent de simuler les variations de performance en fonction des proportions de phases du liant, et d'obtenir un équilibre entre la ténacité et la résistance des mandrins. Les simulations de traitement thermique mettent en évidence l'évolution du grain, définissant ainsi la voie à suivre pour améliorer la durabilité des mandrins.

L'intégration de simulations multi-échelles dans les mandrins de rivetage en alliage de tungstène offre une perspective computationnelle allant de l'échelle atomique à celle du composant, facilite la prédiction des performances de l'outil grâce à l'imbrication de modèles et contribue à l'amélioration de la conception par la simulation. Cette approche systématique intégrée rend le développement des mandrins plus prospectif et ouvre la voie à des calculs permettant d'optimiser leur durabilité.

6.3.4 Essai de sensibilité à la fissuration par corrosion sous contrainte sur des mandrins de rivets en alliage de tungstène

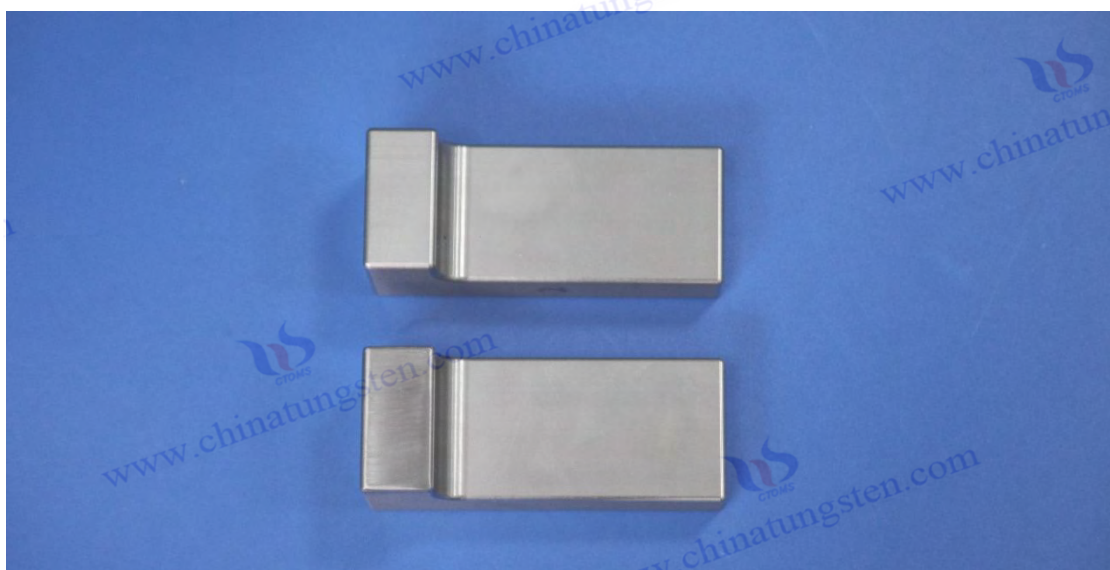
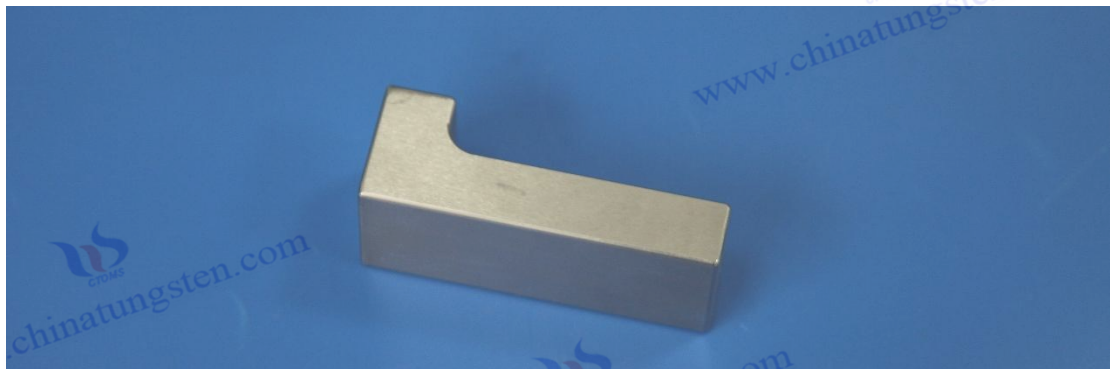
La résistance à la fissuration par corrosion sous contrainte des mandrins de rivets en alliage de tungstène est principalement testée par des essais de traction à charge constante ou à vitesse de déformation lente. Ces essais appliquent une contrainte dans un milieu corrosif simulé, en observant l'amorçage et la propagation des fissures afin d'évaluer leur durabilité en conditions humides. Les échantillons sont préalablement entaillés ou lissés, puis immergés dans un milieu contenant du chlore ou du soufre. Chimiquement, la contrainte favorise la dissolution anodique, induisant une fissuration synergique avec la corrosion du milieu. Les essais à charge constante maintiennent une contrainte fixe et observent les résultats jusqu'à rupture. Les essais de traction à vitesse de déformation lente appliquent une charge dynamique et enregistrent les variations de la courbe.

Le processus d'essai se divise en plusieurs étapes. Lors de l'étape initiale, la couche de passivation est endommagée, la phase liante se dissout, induisant une corrosion par piqûres, et la concentration des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contraintes provoque l'amorçage de fissures. Lors de l'étape intermédiaire, les fissures se propagent le long des joints de grains ou des interfaces, et leur trajectoire se courbe dans la structure biphasée de la barre supérieure. Lors de l'étape finale, la rupture s'accélère et sa propagation est lente lorsque la barre supérieure présente une bonne ténacité. La température et l'humidité de l'environnement d'essai sont contrôlées, et les facteurs accélérateurs tels que les ions chlorure augmentent la sensibilité.

Les essais de sensibilité évaluent l'adéquation des mandrins aux applications ; ceux utilisés en ateliers humides doivent présenter une faible sensibilité, tandis que ceux destinés aux environnements secs doivent répondre aux normes. Les essais de traitement thermique ont un impact ; le recuit réduit la sensibilité. Les différences de composition contribuent à une sensibilité moindre ; les systèmes nickel-cuivre présentent une sensibilité plus faible et les mandrins montrent une meilleure résistance à la fissuration par corrosion sous contrainte. Les essais orientent la protection ; les revêtements isolent le milieu, réduisant ainsi la sensibilité. Les essais de sensibilité des mandrins à rivets en alliage de tungstène par fissuration par corrosion sous contrainte offrent une perspective expérimentale de la synergie charge-milieu, contribuant à l'évaluation de la durabilité des outils par l'observation des fissures et participant à la validation des essais en milieux humides. La nature systématique des essais garantit la constance de la sensibilité des mandrins d'un lot à l'autre, permettant ainsi d'améliorer les procédés.



Tige supérieure de rivet en alliage de tungstène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

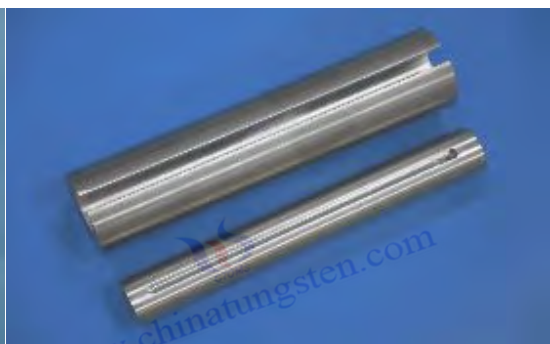
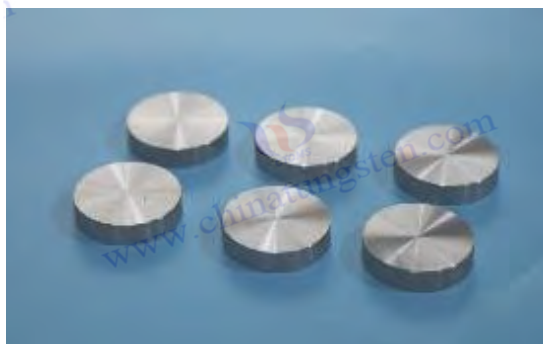
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.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

Chapitre 7 Application des tiges de rivet en alliage de tungstène

7.1 Application des barres supérieures de rivets en alliage de tungstène dans le processus de rivetage

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène sont principalement utilisés comme supports inverses lors du rivetage. Cette application est essentielle pour l'assemblage permanent de tôles ou de composants métalliques, car elle permet une déformation uniforme de la queue du rivet, assurant ainsi une liaison solide. Le mandrin est placé à une extrémité du rivet et supporte l'impact du martelage ou de la pression. La haute densité et la dureté de l'alliage de tungstène concentrent la force de réaction, permettant un écoulement plastique régulier au niveau de la tête du rivet. Ces mandrins sont utilisés pour le rivetage manuel, les riveteuses pneumatiques et les lignes d'assemblage automatisées. La forme du mandrin est adaptée au type de rivet et sa surface lisse réduit le frottement.

de rivetage, le rôle de la broche d'éjection est de contrôler la zone de déformation. La surface de travail plane ou concave de la broche d'éjection absorbe l'expansion de la queue de rivet, garantissant ainsi une résistance de liaison constante. Les broches d'éjection en alliage de tungstène, grâce à leur résistance aux chocs, supportent un fonctionnement à haute fréquence, présentent une usure de surface réduite et nécessitent un entretien minimal. Leurs applications s'étendent au rivetage de différents matériaux ; les rivets en alliage d'aluminium sont utilisés avec des broches d'éjection de dureté équilibrée, tandis que les rivets en acier requièrent des broches d'éjection haute résistance. La stabilité chimique de la broche d'éjection la rend insensible à la contamination par les liquides de refroidissement ou les huiles, assurant ainsi une bonne adaptabilité aux environnements d'assemblage.

L'utilisation de mandrins de rivetage en alliage de tungstène illustre la valeur technique des matériaux d'outillage, améliorant l'efficacité des assemblages grâce à une optimisation des supports et garantissant une performance fiable en assemblage industriel. Avec la diversification des technologies de rivetage, cette application se développe et apporte un soutien concret aux processus d'assemblage.

7.1.1 Action mécanique du mandrin de rivet en alliage de tungstène lors du formage du rivet

Lors du rivetage, le rôle mécanique du mandrin en alliage de tungstène consiste principalement à assurer un support inverse et un transfert d'énergie. Ce rôle permet à la queue du rivet de subir une déformation plastique uniforme sous l'effet d'un impact ou d'une pression, formant ainsi un assemblage fiable. En tant qu'élément de réaction rigide, le mandrin supporte la force du marteau. La densité élevée et la forte inertie de l'alliage de tungstène concentrent la force de réaction à la queue du rivet, tandis que la tête se déplace sans déviation. Le mécanisme mécanique se manifeste par la répartition des contraintes : la surface de travail du mandrin épouse parfaitement la queue du rivet, assurant une contrainte uniforme et évitant les surcharges locales, ce qui permet une déformation symétrique du rivet.

Ses fonctions incluent également l'absorption des vibrations, la phase de collage de la tige supérieure se coordonnant à la micro-déformation pour réduire le jeu mécanique et garantir un fonctionnement fluide. Sur le plan chimique, elle présente un faible frottement interfacial, une surface lisse de la tige supérieure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

limitant l'accumulation de chaleur et une lente élévation de température lors du rivetage. Le corps de la tige supérieure possède une résistance élevée, empêchant la flexion sous charge axiale et assurant un support stable. Les effets mécaniques se manifestent selon le type de rivet : les tiges supérieures des rivets aveugles absorbent la dilatation, tandis que celles des rivets autoperforants résistent au cisaillement. Le mandrin, lors du rivetage, optimise la qualité de l'assemblage. Sa dureté, adaptée au matériau du rivet, garantit une déformation contrôlée et prévient les fissures. En pratique, le mandrin fixe la riveteuse, assurant un transfert de charge direct et une force de serrage constante. L'action mécanique du mandrin en alliage de tungstène illustre le rôle d'un outil de support, contrôlant efficacement la déformation lors du rivetage grâce à la coordination des forces de réaction et fournissant ainsi une base mécanique pour les opérations d'assemblage.

7.1.2 Mécanisme d'interaction entre les matériaux de la tige supérieure et du rivet

Le mécanisme d'interaction entre le mandrin et les matériaux du rivet repose principalement sur le frottement de surface, la conduction thermique et la coordination des déformations. Ce mécanisme détermine la qualité de l'assemblage et la durabilité du mandrin lors du rivetage. Il débute par le contact de la surface de travail du mandrin avec la queue du rivet ; lors de l'impact, le frottement génère un cisaillement ; chimiquement, une surface lisse induit un faible coefficient de frottement, minimisant le glissement du rivet et assurant une déformation uniforme. L'interaction inclut un échange thermique : la déformation plastique du rivet génère de la chaleur, qui est conduite au mandrin ; l'alliage de tungstène assure la conductivité thermique et contribue à la dissipation de la chaleur ; le gradient de température est faible.

Ce mécanisme implique également un transfert de matière : lorsque le rivet est mou, une petite quantité adhère au mandrin ; lorsque le mandrin est dur, le transfert est moindre et la surface est plus facile à nettoyer. La phase d'adhérence se coordonne avec les micro-déformations, absorbant l'énergie de rebond du rivet et stabilisant ainsi la forme du mandrin. Un mécanisme de stabilité chimique intervient également : la couche de passivation à la surface du mandrin résiste à la corrosion par les oxydes du rivet, et le mandrin conserve sa surface lisse après interaction.

Le mécanisme d'interaction est influencé par le matériau du rivet ; les rivets en aluminium présentent une interaction douce et modérée, tandis que les rivets en acier exigent une résistance à l'usure élevée du mandrin en raison d'un frottement important. Des traitements de surface optimisés réduisent l'adhérence du revêtement du mandrin, ce qui permet une formation plus lisse des rivets. Le mécanisme d'interaction entre le mandrin et les matériaux des rivets reflète la réponse des matériaux au contact, assurant la stabilité du processus de rivetage par une coordination frictionnelle et thermique, et constituant un mécanisme fondamental du processus d'assemblage.

7.1.2.1 Analyse de la distribution des contraintes de contact dans les applications de tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

L'analyse de la distribution des contraintes de contact dans les applications de mandrins à rivets en alliage de tungstène se concentre principalement sur la transmission de la pression et les caractéristiques de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

charge locale entre la surface de travail du mandrin et l'extrémité du rivet. Cette analyse permet de comprendre l'uniformité du support et l'effet de contrôle de la déformation du mandrin pendant le rivetage. La distribution des contraintes de contact résulte de la force de réaction entre la face d'extrémité du mandrin et l'extrémité du rivet. La dureté élevée de l'alliage de tungstène entraîne une concentration des contraintes au centre de contact, celles-ci diminuant progressivement vers les bords, créant ainsi une distribution graduelle. Chimiquement, le frottement interfacial influence cette distribution : une surface lisse induit une contrainte plus uniforme, tandis qu'une surface rugueuse engendre des pics de contrainte locaux plus élevés.

L'analyse a été réalisée par simulation aux éléments finis ou par essais d'indentation. Le mandrin présente une forte rigidité axiale, une faible décroissance des contraintes le long du rayon et une pression constante dans la zone de déformation au niveau de la queue du rivet. La concavité du mandrin ajuste la distribution des contraintes, compensant la dilatation de la queue et diffusant les contraintes vers les bords afin d'éviter une surcharge au centre. Après formage à chaud, la microstructure devient fibreuse, ce qui améliore la transmission des contraintes axiales et stabilise la distribution des contraintes dans le mandrin. L'analyse de la composition révèle également l'influence d'une forte teneur en tungstène, qui confère une rigidité élevée et une distribution concentrée, tandis que la présence d'une phase liante en grande quantité assure une distribution des contraintes plus flexible et homogène.

L'analyse de la distribution des contraintes de contact a également permis d'évaluer l'adéquation des matériaux des rivets ; les rivets souples présentaient une distribution de contraintes large et uniforme, tandis que les rivets durs nécessitaient un mandrin de haute dureté. L'analyse du traitement de surface a révélé que le revêtement réduisait le coefficient de frottement et optimisait la distribution des contraintes. L'analyse de la stabilité chimique a montré que la surface du mandrin restait inchangée en l'absence de couche réactive. L'analyse de la distribution des contraintes de contact dans les applications de mandrins de rivets en alliage de tungstène offre une perspective mécanique sur l'interaction de pression, et la distribution optimisée contribue aux performances de l'outil, fournissant ainsi une base analytique aux procédés de rivetage.

7.1.2.2 Influence de la coordination de la déformation sur la durabilité des têtes de rivets en alliage de tungstène

La coordination de la déformation influençant la durabilité des mandrins de rivetage en alliage de tungstène se manifeste principalement dans la réponse de la microstructure biphasée aux contraintes et déformations. Cette influence permet au mandrin d'absorber l'énergie lors des impacts de rivetage, réduisant ainsi l'accumulation des dommages. Le mécanisme de coordination de la déformation résulte de la synergie entre le squelette rigide des particules de tungstène et le réseau plastique de la phase liante. Lors de l'impact, la phase tungstène résiste à la compression, tandis que la phase liante s'étend pour amortir la dilatation latérale, ce qui se traduit par une faible déformation globale du mandrin et une légère indentation de la surface de travail.

Le processus d'impact se déroule en plusieurs étapes : initialement, une coordination élastique et une contrainte uniforme s'établissent ; dans une étape intermédiaire, une déformation plastique se produit, la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

phase liante glisse et absorbe de l'énergie, ce qui limite les micro-dommages du mandrin ; dans une étape finale, la forme du mandrin est rétablie. Chimiquement, la liaison interfaciale est forte et la coordination est obtenue sans séparation. Le traitement thermique influe sur la coordination ; le recuit entraîne une densité de dislocations plus faible et une meilleure coordination, ce qui confère au mandrin une meilleure résistance à la fatigue. La composition influe également sur la coordination ; le système nickel-cuivre présente une ductilité et une coordination supérieures, ce qui permet un rétablissement plus rapide du mandrin après l'impact.

L'impact de la coordination des déformations permet également d'évaluer les dommages de surface ; une bonne coordination assure une usure uniforme du mandrin et prolonge sa durée de vie. Une dureté élevée des rivets exige une coordination optimale, et un taux de liaison modéré du mandrin est essentiel. Le traitement de surface influe sur la coordination ; les revêtements flexibles favorisent l'absorption des déformations. L'influence de la coordination des déformations sur la durabilité des mandrins de rivets en alliage de tungstène reflète un mécanisme de réponse interfaciale, contribuant à l'amélioration de la durée de vie de l'outil grâce à une coordination optimisée et constituant un fondement solide pour la durabilité des opérations de rivetage.

7.1.3 Exigences relatives aux performances des riveteuses en alliage de tungstène pour le rivetage à haute résistance

Les exigences relatives aux mandrins de rivets en alliage de tungstène pour le rivetage haute résistance portent principalement sur la résistance aux chocs, la répartition de la dureté et la stabilité dimensionnelle. Ces exigences découlent du fait que les rivets haute résistance, tels que les rivets en alliage de titane ou en acier haute résistance, nécessitent une force de réaction plus importante et un support précis lors de la déformation. Le mandrin doit présenter une dureté élevée pour résister à l'usure par indentation au niveau de la queue du rivet. Le squelette de particules de tungstène de l'alliage assure la rigidité, et la phase de liaison coordonne les micro-déformations, empêchant ainsi l'indentation ou l'écaillage rapide de la surface de travail du mandrin. Chimiquement, il présente une forte liaison interfaciale, empêchant la séparation sous concentration de contraintes et garantissant une capacité de charge globale uniforme.

Les exigences comprennent également la résistance à la fatigue ; le rivetage haute résistance implique souvent des opérations à haute fréquence, et l'accumulation des dommages sous l'impact cyclique du mandrin est lente, la fibrose tissulaire renforçant la résistance à la fatigue. Une stabilité thermique élevée est également cruciale, avec une faible tendance au ramollissement du mandrin sous l'effet de la chaleur de rivetage ou dans des conditions de rivetage à chaud, minimisant les variations dimensionnelles et maintenant un ajustement précis. Une densité élevée assure une forte force de réaction inertielle, une pression concentrée dans la zone de déformation du rivet et une résistance de liaison constante.

Le rivetage haute résistance exige une surface lisse sur le mandrin, un faible coefficient de frottement pour limiter l'échauffement et une montée en température lente. La stabilité chimique est indispensable pour résister à la corrosion par le liquide de refroidissement et garantir l'absence de piqûres sur la surface du mandrin, même après une utilisation prolongée. La face d'extrémité doit être concave pour absorber les déformations importantes et assurer un support stable. Les performances requises pour les mandrins

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de rivetage en alliage de tungstène en rivetage haute résistance reflètent l'adaptabilité de l'outil aux charges élevées, garantissant la qualité de l'assemblage grâce à un équilibre optimal entre dureté et ténacité, et assurant une fiabilité à toute épreuve dans les applications exigeantes.

7.1.4 Adaptabilité des barres supérieures de rivets en alliage de tungstène dans les équipements de rivetage automatisés

Les mandrins à rivets en alliage de tungstène utilisés dans les équipements de rivetage automatisés se distinguent principalement par leur remplacement rapide, leur précision de positionnement et leur durabilité. Cette adaptabilité permet une intégration aisée avec les robots ou les riveteuses CNC, optimisant ainsi l'efficacité d'assemblage. L'extrémité fixe du mandrin est dotée d'une interface standard pour une installation rapide par encliquetage ou filetage. La grande circularité du mandrin en alliage de tungstène garantit une excellente répétabilité de positionnement, et l'équipement assure un serrage stable et sans déviation. La surface traitée chimiquement est lisse et présente un faible coefficient de frottement, facilitant ainsi l'insertion du mandrin dans l'équipement.

L'adaptabilité du mandrin lors des opérations automatisées à haute fréquence réduit les dommages dus à la résonance. Sa dureté élevée lui permet de résister aux impacts à grande vitesse ; l'usure uniforme de sa surface de travail prolonge sa durée de vie et réduit les temps d'arrêt pour remplacement. Sa stabilité thermique assure un rivetage continu ; la dissipation de chaleur du mandrin contribue à une montée en température lente, minimisant ainsi l'impact sur la précision grâce à des dimensions constantes. Sa densité modérée s'adapte à la charge de l'équipement ; la masse du mandrin n'augmente pas la charge sur le bras robotisé.

Dans un équipement automatisé, l'adaptabilité des mandrins requiert diverses faces d'extrémité, avec une commutation concave-plate pour supporter différents rivets, et un stock de mandrins standardisé. La stabilité chimique s'adapte aux fluides de refroidissement, ce qui réduit la corrosion et minimise la maintenance. L'adaptabilité des mandrins à rivets en alliage de tungstène dans les équipements de rivetage automatisés démontre la coordination entre les outils et les machines, favorisant l'automatisation de l'assemblage grâce à une adéquation des interfaces et des performances, et contribuant ainsi à l'efficacité de la ligne de production.

7.2 Application des barres supérieures de rivets en alliage de tungstène dans les assemblages structuraux aérospatiaux

Les mandrins à riveter en alliage de tungstène sont principalement utilisés dans les assemblages structuraux aérospatiaux comme outils de support pour le rivetage haute résistance. On les retrouve notamment dans l'assemblage des fuselages d'avions, des composants de moteurs et des structures de satellites, contribuant ainsi à la réalisation d'assemblages fiables de matériaux légers et haute résistance. La densité et la dureté élevées du mandrin assurent une force de réaction stable, la microstructure biphasée de l'alliage de tungstène optimise la déformation par impact et la surface de travail lisse du mandrin réduit l'endommagement du matériau. Les assemblages aérospatiaux privilégient la maîtrise du poids et la résistance à la fatigue ; les mandrins en alliage de tungstène, grâce à leur densité modérée et leur grande durabilité, sont parfaitement adaptés aux environnements soumis à des charges répétées.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mandrin supporte les rivets en alliage de titane ou en matériau composite, sa face d'extrémité étant conçue pour épouser la forme du rivet. La surface concave permet l'expansion de la queue, tandis que la surface plane assure un support précis temporaire. Il présente une excellente stabilité chimique, résiste aux agents de nettoyage aérospatiaux et sa surface est inaltérable, préservant ainsi la qualité de l'assemblage. Compatible avec les équipements de rivetage automatisés grâce à des interfaces de mandrin standardisées, il permet un fonctionnement robotisé de haute précision. L'utilisation de mandrins à rivets en alliage de tungstène dans les assemblages structuraux aérospatiaux illustre l'adaptabilité des matériaux d'outillage, améliorant la qualité des assemblages par l'optimisation du support et garantissant des performances fiables pour les structures légères.

7.2.1 Principes de sélection des têtes de rivets en alliage de tungstène pour le rivetage en alliage de titane

Le choix des mandrins en alliage de tungstène pour le rivetage des alliages de titane repose principalement sur l'adéquation de leur dureté, leur résistance aux chocs et leur compatibilité de surface. Ces principes garantissent un support stable du mandrin lors de la déformation des rivets en titane haute résistance, évitant ainsi tout dommage ou déformation irrégulière. Le principe de dureté exige que la surface de travail du mandrin soit plus dure que l'alliage de titane. La structure en tungstène résiste à l'indentation, ce qui réduit l'indentation du mandrin et assure une force de réaction plus uniforme. Le principe de résistance aux chocs, quant à lui, prend en compte la haute résistance requise pour les rivets en titane ainsi que la densité élevée et la forte inertie des alliages de tungstène, concentrant ainsi le transfert d'énergie à travers le mandrin.

Les critères de sélection comprennent la compatibilité de surface, un mandrin lisse pour limiter l'adhérence des copeaux de titane, l'absence de risque de corrosion galvanique et le placage ou la passivation du mandrin. Les critères dimensionnels incluent l'adéquation au diamètre du rivet, un corps de mandrin légèrement plus large pour accueillir la queue et une concavité modérée de la face d'extrémité pour des raisons esthétiques. Les critères de durabilité évaluent la durée de vie ; les mandrins en alliage de tungstène présentent une bonne ténacité, une faible résistance à la fatigue et nécessitent moins de remplacements lors du rivetage haute fréquence.

Le principe de stabilité thermique est mis en œuvre lors du rivetage à chaud des rivets en titane, grâce au ramollissement du mandrin et au maintien de sa stabilité dimensionnelle. Le principe de pureté chimique minimise les impuretés, évitant ainsi la contamination de la surface du titane. Le choix des mandrins de rivetage en alliage de tungstène pour le rivetage des alliages de titane repose sur une parfaite adéquation entre les outils et les matériaux. Cette adéquation, fondée sur des principes précis, permet d'obtenir des assemblages à haute résistance et constitue un guide de sélection pour les structures aérospatiales.

7.2.2 Exigences relatives aux propriétés de surface des têtes de rivets en alliage de tungstène pour le rivetage de matériaux composites

Les exigences relatives aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène pour les composites portent principalement sur la planéité, la maîtrise du frottement et un contact non destructif. Ces exigences

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

découlent de la sensibilité des matériaux composites aux rayures superficielles et au délaminage, et visent à garantir l'intégrité structurelle après rivetage. Une planéité élevée est indispensable ; la surface de travail du mandrin est polie miroir afin de réduire la rupture des fibres et l'endommagement de la résine, et d'éviter le détachement de particules et la contamination de la couche intermédiaire lors de la déformation de la queue du rivet.

Les exigences en matière de contrôle du frottement se traduisent par un faible coefficient de frottement, une surface brossée ou revêtue sur la broche d'éjection, et un glissement fluide afin d'éviter un couple excessif susceptible de déformer le panneau composite. Chimiquement, la broche d'éjection est très inerte et ne produit aucun produit de réaction affectant le durcissement de la résine. L'exigence de non-endommagement implique une transition douce à l'extrémité de la broche d'éjection, une répartition uniforme de la pression et l'absence d'indentations ou de microfissures dans le matériau composite lorsqu'il est soutenu par la broche d'éjection.

Les exigences comprennent également une conductivité modérée, une décharge électrostatique rapide du rivet et la prévention des dommages causés par les étincelles à la fibre de carbone. Une bonne conduction thermique est requise, avec une dissipation thermique rapide lors du rivetage et une faible élévation de température au niveau du rivet afin de préserver la sensibilité thermique du composite. Un nettoyage facile est également essentiel, sans résidus de résine adsorbée sur la surface du rivet. Les caractéristiques de surface des rivets en alliage de tungstène utilisés pour le rivetage des composites reflètent l'interaction entre l'outil et le matériau sensible. Des caractéristiques optimisées permettent un assemblage non destructif, assurant ainsi la protection des surfaces des structures composites aérospace.

7.2.3 Analyse de la stabilité des têtes de rivets en alliage de tungstène en environnement vibratoire

L'analyse de stabilité des mandrins de rivetage en alliage de tungstène soumis à des vibrations se concentre principalement sur leur comportement sous charges mécaniques cycliques. Cette analyse permet de comprendre la conservation de la forme et la fiabilité du mandrin lors d'assemblages ou d'utilisations dynamiques. Les vibrations sont fréquentes lors des oscillations mécaniques sur les équipements ou sur les chaînes de montage. En tant qu'outil de support, le mandrin doit résister à ces charges sans déformation ni dommage significatifs. La structure biphasée de l'alliage de tungstène est prise en compte dans l'analyse : le squelette de particules de tungstène assure la rigidité nécessaire pour résister aux vibrations, tandis que la phase liante coordonne l'absorption d'énergie des micro-déformations. La stabilité globale du mandrin dépend de l'interaction entre ces deux phases.

Le processus d'analyse a été simulé par des essais de vibration. La tige supérieure a été fixée sur une table vibrante, et différentes fréquences et amplitudes ont été appliquées. Les variations de déplacement et de contrainte ont été enregistrées. Une liaison chimique interfaciale plus forte a entraîné une atténuation plus rapide des vibrations et une moindre tendance à la résonance de la tige supérieure. L'analyse de stabilité a permis d'évaluer la fréquence de résonance. Un rapport d'aspect élevé de la tige supérieure a révélé une sensibilité aux basses fréquences ; une conception plus courte et plus épaisse a optimisé la stabilité. Des effets thermiques ont accompagné la vibration ; la génération de chaleur par frottement a été atténuée par la conductivité thermique de la tige supérieure, ce qui a favorisé la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dissipation de la chaleur et, par conséquent, une élévation de température plus lente et une meilleure stabilité.

L'analyse vibratoire prend également en compte l'accumulation de fatigue. Sous vibrations cycliques, la propagation des micro-dommages dans le mandrin est lente et la phase liante se régénère rapidement, permettant ainsi une prédiction de la durée de vie. L'analyse de la composition joue également un rôle : le système nickel-cuivre présente un bon amortissement et une forte absorption des vibrations, tandis que les systèmes nickel-fer offrent une résistance et une stabilité élevées. L'analyse du traitement de surface renforce cet effet : les textures brossées dispersent l'énergie vibratoire, améliorant ainsi la stabilité du mandrin. La gestion de la pureté minimise les impuretés, réduisant d'autant les points d'amorçage des défauts lors des vibrations.

L'analyse de stabilité du mandrin sous vibrations oriente sa conception ; une face d'extrémité plane assure un support uniforme, garantissant une répartition homogène des contraintes lors des vibrations. L'analyse du traitement thermique révèle l'impact du recuit, qui libère les contraintes résiduelles et améliore la stabilité. L'analyse de la stabilité vibratoire des mandrins de rivetage en alliage de tungstène démontre l'évaluation de la réponse dynamique du matériau, facilite l'adaptation des outils aux vibrations par simulation de charge et contribue à l'analyse des processus d'assemblage. La nature systématique de l'analyse permet de prédire les performances du mandrin en conditions oscillatoires, offrant ainsi une voie d'amélioration continue du processus.

7.2.4 Exigences particulières relatives aux têtes de rivets en alliage de tungstène dans le processus de rivetage à basse température

Les exigences spécifiques relatives aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène utilisés dans les procédés de rivetage cryogénique portent principalement sur la ténacité à basse température et la stabilité dimensionnelle. Ces exigences découlent de la fragilité accrue et du retrait des matériaux à basse température, et garantissent un support fiable et une déformation coordonnée du mandrin lors de l'assemblage à froid. Les environnements à basse température sont fréquents dans les entrepôts cryogéniques ou lors du rivetage d'équipements de la chaîne du froid, où le mandrin doit résister au risque de rupture fragile. La structure biphasée des alliages de tungstène se reflète dans ces exigences : la phase tungstène présente un glissement réduit à basse température, tandis que la phase liante s'étend et se coordonne pour améliorer la ténacité.

Les exigences comprennent une température de transition fragile à basse température basse, afin de garantir que le mandrin absorbe davantage d'énergie lors des impacts à des températures négatives et prévienne ainsi les ruptures soudaines. Des exigences de composition spécifiques s'appliquent : les systèmes nickel-cuivre présentent une bonne ténacité à basse température et une forte résistance aux chocs à froid au niveau du mandrin ; les systèmes nickel-fer nécessitent des additifs pour réguler la température de transition. Le traitement thermique requiert un vieillissement à basse température pour renforcer les joints de grains par précipitation, ce qui réduit considérablement la fragilité du mandrin.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La stabilité dimensionnelle exige un retrait minimal à basse température, un faible coefficient de dilatation thermique pour le mandrin et un ajustement précis avec le rivet lors du maintien. Une surface lisse est indispensable pour minimiser le frottement lors du maintien de la déformation du rivet à basse température et pour prévenir les effets de la condensation et du gel. La stabilité chimique requiert une résistance à l'oxygène à basse température, sans corrosion par le gel sur la surface du mandrin. Ces exigences spécifiques pour les mandrins de rivets en alliage de tungstène utilisés dans les procédés de rivetage à basse température reflètent les exigences du matériau en matière d'adaptabilité aux environnements froids. Leur robustesse et leur stabilité contribuent aux performances de l'outil à basse température, répondant ainsi aux exigences fondamentales de l'assemblage à froid.

7.3 Application des tiges de rivet en alliage de tungstène dans la fabrication des transports automobiles et ferroviaires

Les mandrins à riveter en alliage de tungstène sont principalement utilisés comme outils de support de rivetage dans les secteurs de l'automobile et du ferroviaire. Cette application est courante pour les assemblages structuraux de carrosseries, de cabines ou de châssis, permettant un rivetage haute résistance de matériaux légers. L'industrie automobile privilégie la légèreté et la haute résistance, tandis que le transport ferroviaire privilégie la durabilité et la résistance aux vibrations. La densité et la dureté élevées du mandrin assurent une force de réaction stable, et la structure biphasée de l'alliage de tungstène optimise la déformation par impact. Ces mandrins permettent le rivetage d'alliages d'aluminium, de tôles d'acier et de matériaux composites, la conception de leur face d'extrémité étant adaptée au type de rivet.

Sur les chaînes d'assemblage de carrosseries automobiles, les tiges supérieures de rivetage permettent le rivetage autoperforant ou aveugle, garantissant une résistance d'assemblage constante et une excellente tenue aux chocs. Dans la fabrication de véhicules de transport ferroviaire, ces tiges sont utilisées pour le rivetage de l'acier inoxydable ou des alliages d'aluminium, assurant un support stable même en environnements vibrants. Elles présentent une bonne stabilité chimique et résistent aux contaminants des liquides de refroidissement et des huiles d'atelier. Leur compatibilité avec l'automatisation est également optimale, grâce à des interfaces standardisées permettant un fonctionnement fluide des robots. L'utilisation de tiges supérieures de rivetage en alliage de tungstène dans les secteurs automobile et ferroviaire illustre l'adaptabilité des matériaux d'outillage, améliorant l'efficacité d'assemblage par l'optimisation du support et garantissant des performances fiables lors de l'assemblage de structures de transport.

7.3.1 Adaptabilité des barres supérieures de rivets en alliage de tungstène dans le rivetage de carrosseries de véhicules légers

Dans le rivetage de carrosseries de véhicules légers, l'adaptabilité des barres de rivetage en alliage de tungstène réside principalement dans leur capacité à supporter des rivets en alliage d'aluminium ou en acier haute résistance. Cette adaptabilité contribue à la réduction du poids tout en préservant la solidité de l'assemblage. Les carrosseries de véhicules légers utilisent souvent des tôles d'aluminium ou des matériaux hybrides, et le rivetage exige une maîtrise des déformations afin d'éviter tout dommage. La

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dureté élevée de la barre de rivetage résiste à la pression des rivets en aluminium, sa surface de travail lisse réduit les rayures, et le support est uniforme, assurant ainsi une formation symétrique des rivets.

Le mécanisme adaptatif se manifeste par un équilibre mécanique optimal ; l'alliage de tungstène, de densité modérée, concentre les forces de réaction sans alourdir l'équipement ; l'inertie de la tige supérieure favorise le transfert d'énergie ; et l'extrémité du rivet se dilate en douceur. La phase d'adhérence est coordonnée avec une déformation minimale, ce qui assure une bonne absorption des vibrations lors de l'impact de la tige supérieure et évite toute contrainte supplémentaire sur les panneaux de carrosserie. La stabilité chimique est compatible avec le liquide de refroidissement de la chaîne de montage, et la surface de la tige supérieure est exempte de corrosion, préservant ainsi la qualité de la liaison. La conception de la face d'extrémité, plate ou légèrement concave, permet l'utilisation de rivets autoperforants ou pleins, garantissant une grande précision dans la pose de la tige supérieure.

L'adaptabilité des tiges supérieures pour le rivetage léger inclut la compatibilité avec l'automatisation, une bonne circularité pour un serrage robotisé stable et une longue durée de vie lors d'opérations à haute fréquence. Après traitement thermique, la microstructure est uniforme, la tige supérieure présente une forte résistance à la fatigue et nécessite moins de remplacements sur les lignes de production continues. Le polissage de surface est aisé, le frottement est faible, le glissement des rivets est minimal et la qualité de formage est stable. L'adaptabilité des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène pour le rivetage léger de carrosseries automobiles démontre la compatibilité de l'outil avec les matériaux d'allègement, permettant une liaison légère et résistante grâce à un support optimisé, et apportant une réelle valeur ajoutée à la fabrication automobile.

7.3.2 Étude du comportement à l'usure des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène lors d'un processus de rivetage à haute fréquence

L'étude du comportement à l'usure des mandrins de rivets en alliage de tungstène lors du rivetage haute fréquence porte principalement sur l'évolution des dommages de surface sous l'effet d'impacts rapides et continus. Cette étude contribue à la compréhension de la durabilité des mandrins dans les lignes d'assemblage automatisées à haute cadence. Le rivetage haute fréquence implique des fréquences d'impact de plusieurs dizaines, voire plus, par minute, la surface de travail du mandrin étant en contact répété avec la queue du rivet. Le frottement et l'accumulation d'indentations entraînent l'usure. La structure biphasée des alliages de tungstène est mise en évidence par cette étude : la dureté élevée des particules de tungstène résiste à l'indentation, tandis que la phase de liaison coordonne les micro-déformations pour absorber l'énergie, ce qui confère au mandrin une morphologie d'usure uniforme et fine. L'étude a été menée par le biais d'expériences de simulation ou de la surveillance d'une ligne de production. Un pistolet à riveter haute fréquence, équipé d'une tige supérieure, a été utilisé. La rugosité de surface et la perte de volume ont été enregistrées après un certain nombre de cycles. Chimiquement, la phase liante s'est usée préférentiellement, formant des piqûres superficielles. Après l'exposition des particules de tungstène, l'abrasion a ralenti. L'usure s'est manifestée par phases : initialement, la surface polie était lisse et l'usure lente ; dans une phase intermédiaire, des micro-piqûres se sont accumulées, augmentant la rugosité ; et dans une phase finale, le taux d'usure s'est stabilisé. Les effets thermiques liés à la haute fréquence, tels que la génération de chaleur par frottement, ont accéléré l'usure oxydative,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tandis que la conduction thermique de la tige supérieure a favorisé la dissipation de la chaleur, atténuant ainsi l'usure.

L'étude du procédé haute fréquence a également permis d'évaluer l'influence de la forme de la face d'extrémité. Les surfaces concaves présentent une usure plus étendue due à la déformation, tandis que les surfaces planes montrent une usure temporaire mais uniforme. L'efficacité du traitement de surface a été évaluée ; le plaquage ou le durcissement ont entraîné une faible usure initiale, mais par la suite, une fois le substrat exposé, le comportement à l'usure s'est inversé. Les différences de composition ont été prises en compte : les systèmes tungstène-cuivre ont montré une bonne conductivité thermique et un faible impact thermique sur l'usure, tandis que les systèmes nickel-fer ont présenté une dureté élevée et une forte résistance à l'abrasion. Le procédé de rivetage haute fréquence a permis d'étudier l'endommagement sous charge continue des mandrins de rivets en alliage de tungstène. L'analyse comportementale a contribué à l'évaluation de la durée de vie des outils et a fourni des références en matière de durabilité pour l'assemblage automatisé.

7.3.3 Compatibilité des têtes de rivets en alliage de tungstène dans les assemblages multi-matériaux

L'utilisation de mandrins à rivets en alliage de tungstène dans les assemblages multi-matériaux se caractérise principalement par leur adaptabilité à différents matériaux de rivets et à la tôle. Cette compatibilité est particulièrement visible dans le rivetage de structures hybrides, telles que les assemblages aluminium-acier ou en composite aluminium-acier, garantissant un support stable et sans dommage grâce au mandrin. Cette compatibilité résulte de l'équilibre entre la dureté et l'état de surface du mandrin : la dureté élevée de l'alliage de tungstène résiste à l'indentation des rivets en acier, tandis que la surface lisse réduit les rayures sur les plaques d'aluminium ou composites. Chimiquement, le mandrin est très inerte, sans couplage galvanique ni réaction affectant l'interface entre les matériaux dissemblables.

Le mécanisme de compatibilité se traduit par une coordination optimale de la déformation : lorsque la surface de travail du mandrin est en contact avec un rivet souple, la force de réaction est atténuée, évitant ainsi l'écrasement de la couche composite ; avec un rivet rigide, la rigidité élevée du mandrin induit une déformation concentrée et un formage précis. La conception de la face d'extrémité est compatible avec diverses applications : les zones légèrement concaves permettent la dilatation des rivets en aluminium, tandis que les surfaces planes assurent un support temporaire pour les rivets en acier. La compatibilité de la conduction thermique garantit une dissipation thermique rapide, et le mandrin maintient une élévation de température stable malgré les variations de chaleur générées par les différents matériaux. La compatibilité des traitements de surface assure des revêtements flexibles, et le contact du mandrin avec la résine composite est exempt de pollution.

La compatibilité des mandrins pour l'assemblage multi-matériaux évalue également leur réponse vibratoire. Les structures hybrides présentent des vibrations complexes, et les mandrins à amortissement coordonné minimisent les dommages. Leur stabilité chimique garantit la compatibilité avec les produits de nettoyage, empêchant ainsi la contamination de la zone de joint par les produits de corrosion. La compatibilité et l'ajustement de leur composition, associés à la conductivité tungstène-cuivre favorisant

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la décharge électrostatique, les rendent adaptés aux composites en fibre de carbone. La compatibilité des mandrins à riveter en alliage de tungstène pour l'assemblage multi-matériaux démontre l'adaptabilité de l'outil aux matériaux dissemblables. Grâce à une dureté et un état de surface coordonnés, ils permettent un rivetage fiable des structures hybrides, contribuant ainsi à la compatibilité dans la fabrication de pièces légères.

7.4 Application des tiges de rivet en alliage de tungstène dans l'assemblage mécanique de précision

Les mandrins à riveter en alliage de tungstène sont principalement utilisés en assemblage mécanique de précision comme outils de support pour le rivetage miniature ou de haute précision. Cette application est courante dans les assemblages structuraux de domaines tels que l'instrumentation, les dispositifs médicaux et l'optique, permettant une fixation fiable des petits composants. L'assemblage mécanique de précision exige des liaisons sans dommage, une déformation précise et une grande régularité dimensionnelle. La dureté élevée et la surface lisse du mandrin assurent une force de réaction stable, tandis que la structure biphasée de l'alliage de tungstène atténue les micro-impacts, évitant ainsi les rayures et les concentrations de contraintes sur les composants.

Pour ses applications, le mandrin présente un diamètre réduit et une surface de travail polie miroir, assurant une répartition uniforme de la pression lors du maintien des micro-rivets. Sa grande stabilité chimique le rend résistant aux environnements de salles blanches et empêche la libération de particules susceptibles de contaminer les pièces de précision. Compatible avec les riveteuses de précision manuelles et électriques, l'interface miniaturisée du mandrin offre une grande flexibilité d'utilisation. L'emploi de mandrins à riveter en alliage de tungstène dans l'assemblage mécanique de précision démontre l'adaptation précise des matériaux d'outillage, améliorant la qualité des assemblages de petite taille grâce à un support optimisé et garantissant des performances fiables dans la fabrication de haute précision.

7.4.1 Exigences relatives à la précision dimensionnelle des barres supérieures de rivets en alliage de tungstène pour le micro-rivetage

Les exigences relatives aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène pour le micro-rivetage portent principalement sur leur diamètre, la planéité de leur surface de travail et leur coaxialité. Ces exigences garantissent un positionnement précis et une pression uniforme du mandrin lors du maintien de petits rivets, évitant ainsi toute déformation ou déplacement des composants de précision. Le diamètre du mandrin doit correspondre à celui de la queue du micro-rivet avec une tolérance minimale afin d'assurer un ajustement serré. Chimiquement, une surface lisse réduit le frottement, et une grande précision dimensionnelle permet une formation symétrique des rivets. La planéité exige une surface de travail lisse, sans aspérités localisées lors du maintien, et sans indentations sur les composants de l'instrument de précision.

Le mécanisme doit être adapté au contrôle des tolérances, avec une coaxialité élevée du corps de la tige pour éviter les charges excentrées et une répartition uniforme des contraintes lors de l'impact. Une précision de longueur constante est requise, la broche d'éjection doit être positionnée de manière stable dans l'équipement et sa position doit rester inchangée lors des rivetages répétés. Une stabilité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dimensionnelle élevée est requise après traitement thermique, avec un retrait thermique minimal de la broche d'éjection, et la précision doit être maintenue malgré les fluctuations de température de l'environnement d'assemblage.

Les exigences de précision dimensionnelle des mandrins pour le micro-rivetage comprennent la maîtrise de la forme de la face d'extrémité, le formage précis de têtes concaves ou plates peu profondes, et la capacité d'absorber la dilatation lors du micro-rivetage sans débordement. Une faible rugosité de surface requiert une précision auxiliaire, et un faible frottement du mandrin garantit une déformation régulière. La gestion de la pureté chimique minimise les impuretés et assure un traitement dimensionnel constant. Les exigences de précision dimensionnelle des mandrins de rivets en alliage de tungstène pour le micro-rivetage reflètent les contraintes géométriques des outils de précision. L'optimisation de la précision permet la réalisation fiable de petites connexions et contribue à la fiabilité dimensionnelle de l'assemblage des instruments.

7.4.2 Le rôle de la modification de surface dans l'application de précision des mandrins à rivets en alliage de tungstène

Pour les applications de précision utilisant des mandrins à rivets en alliage de tungstène, la modification de surface est principalement réalisée par placage, passivation ou microtexturation. Ce procédé améliore la stabilité de surface et l'adaptabilité fonctionnelle du mandrin lors du rivetage de haute précision. Les applications de précision privilégient un contact non destructif et une planéité durable. La modification de surface forme une couche protectrice qui bloque chimiquement la corrosion environnementale, ralentit l'usure de la surface de travail du mandrin et facilite la formation de rivets réguliers. Les placages tels que le nickel-phosphore ou le chrome-azote augmentent la dureté, ce qui améliore la résistance du mandrin au micro-revissage, tandis qu'une faible rugosité de surface réduit les rayures.

L'effet de la modification se traduit par une meilleure maîtrise du frottement, un faible coefficient de frottement de surface, une réduction du glissement entre l'éjecteur et le rivet, et une déformation uniforme des pièces de précision. Que la couche de passivation soit naturelle ou artificielle, l'éjecteur s'oxyde lentement en salle blanche humide, conservant ainsi un aspect lisse. La modification de la microtexture diffuse la lumière, réduisant l'éblouissement lors du fonctionnement de l'éjecteur et améliorant le confort visuel. L'amélioration de la stabilité chimique après modification rend l'éjecteur résistant aux agents de nettoyage, garantissant l'absence de contamination résiduelle lors de l'assemblage de précision.

La modification de surface influe également sur la gestion thermique ; la conductivité thermique du revêtement favorise la dissipation de la chaleur et ralentit l'échauffement de la broche d'éjection, protégeant ainsi les composants sensibles à la chaleur. Le contrôle de l'épaisseur de la modification garantit le maintien de la précision dimensionnelle de la broche d'éjection. Dans les applications de précision, la modification optimise le contact et le confinement des micro-rivets par la broche d'éjection empêche tout débordement. Le rôle de la modification de surface dans l'application de précision des broches d'éjection de rivets en alliage de tungstène illustre l'apport précieux de l'ingénierie de surface, qui améliore les performances de l'outil grâce à une couche protectrice et assure une base stable pour un assemblage de haute précision.

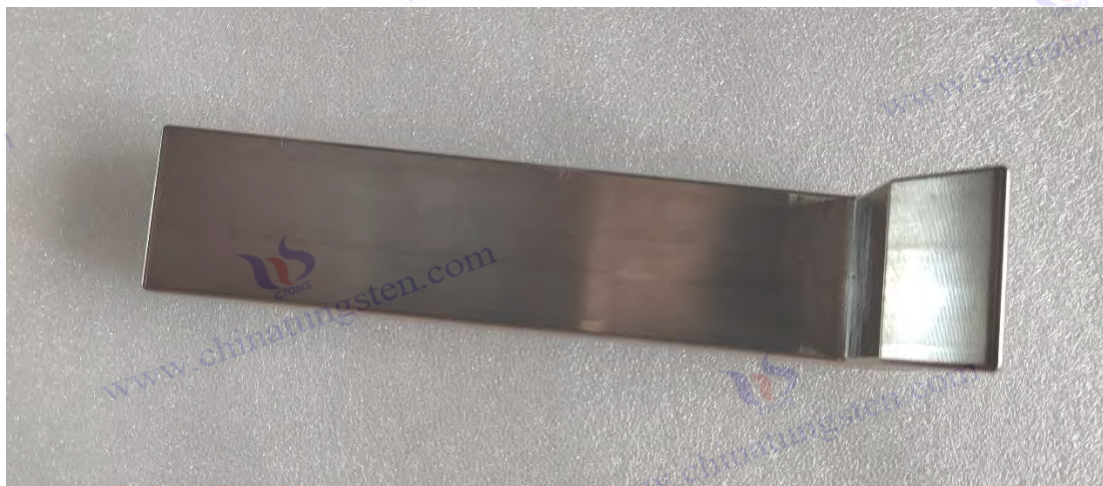
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.4.3 Exigences relatives à l'environnement de salle blanche concernant la pureté du matériau de la tige supérieure du rivet en alliage de tungstène

Les exigences de pureté des tiges de rivet en alliage de tungstène utilisées en salles blanches découlent principalement de la nécessité d'éviter le détachement de particules et la contamination chimique. Cette exigence est cruciale lors du rivetage d'instruments de précision ou de dispositifs médicaux, car elle garantit que les tiges n'introduisent pas d'impuretés susceptibles de nuire à la propreté de l'assemblage. En salles blanches de haute qualité, les matériaux des tiges doivent présenter de faibles émissions de poussières. Les procédés de métallurgie des poudres d'alliage de tungstène permettent de purifier les impuretés et, chimiquement, la faible teneur en oxygène et en carbone réduit le détachement d'oxydes, ce qui permet d'obtenir une surface de tige exempte de particules libres.

Le mécanisme de fabrication se traduit par une propreté de surface irréprochable ; après polissage, l'éjecteur ne laisse que des résidus minimes, réduisant ainsi le risque de détachement en cours d'utilisation. Sa composition, d'une grande pureté, est exempte d'éléments volatils dans le liant, garantissant sa stabilité à haute température ou sous vide. Le traitement thermique, un recuit sous vide, permet d'éliminer complètement les impuretés gazeuses internes et d'éviter leur libération lors de l'utilisation. Le nettoyage chimique, réalisé avec des solvants doux, facilite l'élimination des résidus de la surface de l'éjecteur.

Les exigences relatives aux tiges de rivets en environnement de salle blanche incluent également des variantes non magnétiques ; le système tungstène-cuivre évite l'adsorption de poussières magnétiques. Le revêtement nécessite des matériaux inertes pour empêcher le décollement de la couche protectrice de la tige. Les exigences de pureté sont évaluées par des tests d'émission de poussières ; la tige présente des émissions minimales de particules dues aux vibrations ou au frottement, conformément aux normes requises. Les exigences de pureté des tiges de rivets en alliage de tungstène en environnement de salle blanche reflètent les contraintes matérielles liées à l'assemblage en environnement de haute propreté. La purification garantit le fonctionnement sans contamination de l'outil et contribue à un environnement de précision optimal.



Tige supérieure de rivet en alliage de tungstène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 8 : Problèmes courants liés aux têtes de rivets en alliage de tungstène

8.1 Formation de défauts lors de la fabrication des têtes de rivets en alliage de tungstène

des mandrins à rivets en alliage de tungstène, les défauts proviennent principalement des fluctuations du procédé à différentes étapes de la métallurgie des poudres. Ces défauts affectent l'uniformité de la microstructure du mandrin et la constance de ses propriétés mécaniques. Parmi ces défauts, on retrouve la porosité résiduelle, la ségrégation des particules, les fissures et les inclusions, qui résultent du mélange des matières premières et du traitement post-frittage. Un mélange non homogène entraîne un enrichissement localisé de la phase liante, la compression par gradient de contrainte provoque un délaminage et les écarts dans la plage de températures de frittage entraînent un réarrangement insuffisant ou un écoulement excessif.

Le mécanisme de formation des défauts se manifeste dans l'interaction interfaciale. Lorsque les particules de tungstène ne sont pas suffisamment mouillées par la phase liante, de nombreux pores interfaciaux se forment. Chimiquement, les impuretés réagissent avec l'oxygène et le carbone pour créer des pores fermés par des gaz. Une relaxation thermique inadéquate entraîne la formation de microfissures, et le rapport d'aspect de la tige supérieure amplifie les défauts d'extrémité. Le contrôle des défauts est obtenu par l'optimisation des paramètres et des procédés auxiliaires : le broyage à billes améliore l'homogénéité et le pressage isostatique à chaud ferme les pores.

L'analyse des défauts lors de la fabrication permet d'améliorer la qualité ; l'observation microscopique et les tests de densité révèlent les problèmes ; et les performances du mandrin fournissent des informations pour l'ajustement du processus. La formation de défauts lors de la fabrication de mandrins de rivets en alliage de tungstène illustre les difficultés de la métallurgie des poudres. La maîtrise du processus garantit une production d'outils fiable et assure la qualité des applications de rivetage.

8.1.1 Influence du frittage non uniforme sur la microstructure des mandrins de rivets en alliage de tungstène

L'hétérogénéité du frittage dans la microstructure des mandrins de rivets en alliage de tungstène se manifeste principalement par un gradient de densité et des variations dans la distribution des phases. Cet effet est plus marqué dans les dimensions longitudinales du lingot, affectant la résistance globale et la constance de la résistance aux chocs. L'hétérogénéité du frittage provient des fluctuations du champ de température ou de l'atmosphère, du moment d'apparition de la phase liquide entre le centre et le bord du lingot, et du degré de réarrangement. Dans les zones où la circulation de la phase liquide est insuffisante, les particules de tungstène présentent moins de contacts et une porosité résiduelle plus importante.

Le mécanisme en cause se manifeste par un réarrangement des particules. Dans la zone non uniforme, les particules de tungstène présentent une faible sphéroïdisation, une concentration de contraintes aux angles vifs et une fragilité locale élevée du mandrin. La zone de ségrégation de la phase liante présente une bonne ténacité mais une faible résistance, ce qui entraîne des fluctuations des propriétés axiales du mandrin. L'hétérogénéité de la liaison interfaciale et les variations d'épaisseur dans la zone de diffusion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chimique augmentent le risque de séparation du mandrin lors d'un impact. Après formage à chaud, la non-uniformité est amplifiée, la texture des fibres devient discontinue et la résistance à la flexion du mandrin diminue.

Les effets de l'hétérogénéité du frittage incluent également des différences de taille de grain, entraînant un grossissement des grains dans la zone haute température et un affinement dans la zone basse température, ce qui multiplie les points d'amorçage des fissures de fatigue dans le mandrin. La volatilisation inégale des impuretés exacerbe ce phénomène, provoquant la formation localisée d'une phase de fragilisation dans le mandrin. L'analyse de la distribution de densité par observation métallographique en coupe transversale permet un contrôle précis de la température du four multizone. L'impact de l'hétérogénéité du frittage sur la microstructure des mandrins de rivets en alliage de tungstène illustre la difficulté d'obtenir une uniformité optimale lors du processus à haute température. L'optimisation sur site a permis la formation d'une microstructure fiable, contribuant ainsi à la durabilité de l'outil.

8.1.2 Sources et contrôle de la contamination par les impuretés dans les mandrins de rivets en alliage de tungstène

La contamination des mandrins de rivets en alliage de tungstène provient principalement de la poudre de matière première, de l'atmosphère de traitement et du contact avec les équipements. Cette contamination affecte la pureté et la microstructure du mandrin, pouvant induire une fragilisation ou des défauts de corrosion. Parmi les sources de contamination dans la matière première figurent l'oxygène et le carbone résiduels, la réduction incomplète de la poudre de tungstène entraînant la formation d'oxydes, et l'adsorption de gaz par la poudre de la phase liante. Les sources de contamination dans l'atmosphère de traitement incluent un point de rosée d'hydrogène élevé et la réaction avec la vapeur d'eau, générant chimiquement des phases volatiles à cellules fermées ou fragilisées.

Les sources de contamination comprennent également l'usure des équipements et la chute de particules provenant des moules ou des cuves dans la billette. Les résidus de broyage à billes et les points durs localisés sur la tige d'éjection contribuent également à la contamination. Les mesures de contrôle incluent la purification des matières premières, la réduction en plusieurs étapes de la poudre de tungstène pour réduire la teneur en oxygène et le nettoyage chimique de la poudre d'alliage pour éliminer les impuretés de surface. Le contrôle de l'atmosphère comprend le séchage et la filtration de l'hydrogène, avec un point de rosée bas pour éviter la réoxydation. Les variantes de frittage sous vide réduisent la contamination gazeuse, ce qui permet d'obtenir une tige d'éjection très propre.

Les mesures de contrôle comprennent également la gestion des équipements, l'utilisation de matériaux inertes pour le revêtement des moules et de nacelles de haute pureté afin d'éviter le détachement des particules. Le mélange avec des matériaux sans abrasifs ou des billes de céramique minimise l'introduction de contaminants. Un nettoyage chimique après traitement thermique élimine les résidus volatils. La gestion et le contrôle des impuretés dans les éjecteurs de rivets en alliage de tungstène illustrent les principes d'ingénierie des matériaux en matière de gestion de la pureté. Un contrôle multi-sources garantit la propreté du matériau, condition essentielle à la performance des éjecteurs. La nature

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

systématique de ces contrôles assure la constance des impuretés d'un lot à l'autre, garantissant ainsi la pureté et la durabilité des éjecteurs.

8.1.3 Mécanisme d'amorçage des fissures lors de l'étape de pressage du mandrin à rivets en alliage de tungstène

Le mécanisme d'amorçage des fissures lors du pressage des mandrins de rivets en alliage de tungstène repose principalement sur la concentration des contraintes et la déformation non coordonnée entre les particules de poudre. Ce mécanisme se manifeste lors de la mise en forme à cru et influence le frittage ultérieur ainsi que l'intégrité du produit fini. Pendant le pressage, la poudre remplit le moule et, lors de la transmission de la pression, un réarrangement des particules et une déformation plastique se produisent. La poudre de tungstène présente une dureté et une résistance à la déformation élevées. Chimiquement, le frottement interparticulaire génère des contraintes de cisaillement locales, et le gradient de contrainte est important aux bords et aux angles, ce qui favorise l'amorçage de microfissures.

Le mécanisme se divise en plusieurs étapes. Lors de la phase initiale, la contrainte de compression élastique est uniforme. Lors de la phase intermédiaire, le frottement de glissement des particules augmente et des fissures s'amorcent aux interfaces fragiles. Lors de la phase de compactage finale, l'effet de retour élastique se produit et la relaxation des contraintes à l'extrémité du mandrin présentant le plus grand rapport d'aspect est inégale, ce qui entraîne la propagation de fissures superficielles. Une lubrification insuffisante exacerbe ce mécanisme, générant des contraintes de traction élevées et de nombreuses fissures dues à l'adhérence des particules au moule. L'hétérogénéité de la granulométrie de la poudre influe sur le mécanisme : le mélange de particules grossières et fines entraîne un mauvais remplissage des vides et de nombreux points de concentration de contraintes. Le mécanisme d'amorçage des fissures est également influencé par la méthode de pressage. Le pressage isostatique à froid avec une pression de liquide uniforme réduit le nombre de fissures, tandis que le moulage avec un gradient de pression unidirectionnel important favorise leur apparition. Le mécanisme évolue avec l'augmentation de la température ; le pressage à chaud ramollit le liant, ce qui améliore la coordination et réduit le nombre de fissures. La gestion de la pureté chimique permet de réduire les impuretés et les particules fragiles, diminuant ainsi les sources d'amorçage. Le mécanisme d'amorçage des fissures lors du pressage du mandrin à rivets en alliage de tungstène reflète la réponse du matériau aux contraintes de formage. La maîtrise de la pression préserve l'intégrité de l'ébauche et contribue à la compréhension du mécanisme en vue de l'optimisation du procédé.

8.1.4 Analyse des causes de la porosité résiduelle dans les barres supérieures de rivets en alliage de tungstène

L'analyse des causes de la porosité résiduelle dans les mandrins de rivets en alliage de tungstène se concentre principalement sur le confinement des gaz et le remplissage insuffisant des particules lors des étapes de pressage et de frittage. Ceci entraîne une densité non uniforme du mandrin et une réduction localisée de la résistance. Lors du pressage, l'air ou le gaz adsorbé entre les particules de poudre est comprimé et scellé, et chimiquement, la vapeur d'eau ou l'hydrogène résiduel forme des pores fermés. La porosité est plus élevée lorsque la densité du corps cru est faible. Une large distribution

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

granulométrique est une cause évidente : les particules grossières présentent de grands espaces et sont difficiles à combler, tandis que la poudre fine crée des ponts entre les gaz confinés. Parmi les autres causes, on peut citer un réarrangement insuffisant lors du frittage, un mouvement limité des particules lorsque la phase liquide est peu abondante, un rétrécissement lent des pores et un nombre plus important de pores résiduels. Une plage de températures trop basses est une cause importante, indiquant une fusion incomplète et un mauvais mouillage de la phase liante. Un point de rosée atmosphérique élevé aggrave le problème, car la vapeur d'eau réagit pour former des composés volatils, laissant des pores résiduels. La tige supérieure longue et cylindrique amplifie le problème, avec un écoulement lent de la phase liquide et une concentration de pores à ses extrémités.

L'analyse des causes de la porosité résiduelle permet d'évaluer l'impact des procédés : le pressage isostatique à chaud réduit les pores fermés, et la compression mécanique lors de la repressurisation réduit davantage la porosité résiduelle. La gestion de la pureté chimique minimise la volatilisation des impuretés et réduit les sources de porosité. L'analyse de l'origine guide l'optimisation : la prépressurisation et la purge réduisent les émissions de gaz, et une isolation prolongée favorise le retrait.

8.2 Modes de défaillance des têtes de rivets en alliage de tungstène en cours d'utilisation

Lors de leur utilisation, les mandrins de rivetage en alliage de tungstène subissent principalement des ruptures par surcharge mécanique, une usure par accumulation et des dommages dus à la fatigue. Ces modes de défaillance se manifestent dans les environnements de rivetage à haute fréquence ou sous forte charge, affectant la stabilité du support et la durée de vie du mandrin. Ces modes de défaillance résultent de l'interaction répétée entre le mandrin et la queue du rivet, sous l'effet combiné des contraintes mécaniques, de la chaleur de frottement et des facteurs environnementaux. La surcharge se traduit par une rupture soudaine, l'usure par un enlèvement de matière en surface et la fatigue par la propagation de micro-dommages.

L'analyse des modes de défaillance a été réalisée par observation de la surface de rupture et mesure de l'usure. La structure biphasée du mandrin influence le mécanisme de défaillance : les particules de tungstène résistent aux dommages, tandis que la phase liante coordonne la déformation mais est sujette à la fatigue. L'oxydation chimique de surface accélère l'usure et la corrosion par le milieu aggrave la défaillance. L'étude des modes de défaillance oriente le choix et la maintenance des mandrins ; les mandrins à haute résistance supportent les surcharges et les modèles résistants à l'usure ont une longue durée de vie. Les modes de défaillance des mandrins de rivetage en alliage de tungstène en service reflètent le comportement du matériau sous charge. L'analyse des modes de défaillance contribue à l'optimisation de la durabilité et fournit une référence pour la prévention des défaillances lors du rivetage.

8.2.1 Mécanisme de rupture du mandrin de rivet en alliage de tungstène sous l'effet d'une surcharge mécanique

Les mandrins de rivets en alliage de tungstène, soumis à une surcharge mécanique, présentent principalement des dommages résultant d'une évolution vers une contrainte élevée instantanée. Ce mécanisme se manifeste lors d'impacts violents accidentels ou de défaillances d'équipement, lorsque le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mandrin, en tant qu'élément de support, supporte une charge supérieure à sa capacité nominale. Le mécanisme débute par une concentration de contraintes, avec une déformation locale importante à la surface de travail ou dans les angles du mandrin. Chimiquement, la phase liante subit en premier une déformation plastique, et le squelette de particules de tungstène supporte la majeure partie de la charge. La surcharge accroît l'accumulation de dislocations, augmente les contraintes interfaciales et des microfissures apparaissent dans la phase liante ou entre les particules.

Le mécanisme de rupture se déroule par étapes : initialement, l'énergie est absorbée par coordination ductile ; dans une étape intermédiaire, les fissures se propagent le long des interfaces fragiles, la structure biphasée de la barre supérieure ralentissant la propagation par flexion ; dans une étape finale, la rupture est rapide, la surface de rupture présentant un mélange de cupules et de clivage, la phase liante présentant des cupules profondes et la phase tungstène des surfaces de clivage planes. Les effets thermiques, associés à une surcharge, provoquent un échauffement par frottement, ramollissant la phase liante et accélérant la rupture. En raison des différences de composition, le système nickel-cuivre présente une coordination ductile et une rupture plus lente, tandis que le système nickel-fer présente une résistance plus élevée mais une tendance légèrement plus marquée à la rupture fragile.

Le mécanisme de rupture par surcharge mécanique est également influencé par l'état de surface ; les mandrins de rivetage lisses présentent une contrainte uniforme et une amorce de fissure tardive, tandis que les rayures entraînent une amorce de fissure précoce. Des traitements thermiques optimisés permettent d'obtenir de faibles contraintes résiduelles après recuit et une bonne tolérance à la surcharge. Une pureté chimique contrôlée minimise les impuretés et réduit les points d'amorçage de la fragilité. Le mécanisme de rupture par surcharge mécanique des mandrins de rivetage en alliage de tungstène reflète la défaillance du matériau sous forte charge. L'analyse des chemins de rupture facilite l'évaluation de la charge sur l'outil et contribue à la compréhension des mécanismes de sécurité du rivetage.

8.2.2 Effets cumulatifs de l'usure et de la fatigue des têtes de rivets en alliage de tungstène

L'effet cumulatif de l'usure et de la fatigue des mandrins de rivetage en alliage de tungstène résulte principalement de l'effet synergique des contacts répétés et des contraintes cycliques. Cet effet se manifeste progressivement lors du rivetage à haute fréquence, affectant l'état de surface et la durabilité globale du mandrin. L'accumulation d'usure entraîne un enlèvement de matière en surface, tandis que l'accumulation de fatigue provoque la propagation de micro-dommages ; ces deux phénomènes interagissent et accélèrent la rupture. Aux premiers stades de l'usure, le frottement raye la surface de travail, ramollissant et transférant chimiquement la phase liante et exposant les particules de tungstène à l'abrasion. Aux premiers stades de la fatigue, les dislocations s'accumulent et des microfissures s'amorcent lors des oscillations cycliques. Dans la structure biphasée du mandrin, la phase liante se fatigue en premier.

Le mécanisme d'effet cumulatif se manifeste par l'interaction suivante : les surfaces usées et rugueuses présentent davantage de points de concentration de contraintes, ce qui entraîne une initiation rapide des fissures de fatigue ; les microfissures de fatigue exposent de nouvelles surfaces, accélérant l'usure. Les effets thermiques cumulatifs comprennent la génération de chaleur par frottement qui ramollit la surface

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et accroît l'usure, tandis que l'élévation de la température de l'éjecteur favorise la fatigue. Les facteurs environnementaux cumulatifs, tels que la corrosion synergique due à l'humidité, contribuent également à l'endommagement rapide de l'éjecteur.

L'accumulation de l'usure et de la fatigue est également influencée par la fréquence d'utilisation, avec un effet significatif à haute fréquence, entraînant la formation de piqûres profondes et de nombreuses fissures à la surface du rivet. Le traitement de surface ralentit cette accumulation, et les revêtements offrent une faible usure initiale et une bonne protection contre la fatigue. Les différences de composition contribuent également à l'accumulation de l'usure ; le tungstène-cuivre présente une dissipation thermique et une accumulation d'usure plus lentes, tandis que le nickel-fer, grâce à sa dureté élevée, induit une usure plus lente. L'effet cumulatif de l'usure et de la fatigue dans les rivets en alliage de tungstène reflète les dommages synergiques dus aux charges à long terme. L'analyse de ces effets contribue à la gestion de la durée de vie des outils et fournit une référence globale pour la maintenance des rivets.

8.2.3 Réduction de la durée de vie des mandrins de rivetage en alliage de tungstène due aux environnements corrosifs

La réduction de la durée de vie des mandrins de rivets en alliage de tungstène due aux environnements corrosifs résulte principalement de la dissolution des matériaux de surface et de l'accumulation de dommages structuraux. Cette réduction est particulièrement marquée dans les ateliers humides ou traités chimiquement, où l'état de surface du mandrin se dégrade, affectant la stabilité du support. Les environnements corrosifs comprennent l'humidité, les embruns salins et les agents de nettoyage. Chimiquement, les éléments de la phase liante sont très réactifs et réagissent facilement avec le milieu pour former des couches dissoutes ou poreuses, entraînant progressivement la formation de piqûres à la surface du mandrin. Ce mécanisme de réduction est également observé dans les microcellules, où la phase liante subit une dissolution anodique, tandis que la phase tungstène, bien que relativement inerte, présente une propagation de la corrosion à l'interface, provoquant un amincissement localisé du mandrin.

Le processus de réduction de la corrosion se déroule par étapes. Dans un premier temps, la couche de passivation superficielle est détruite et la corrosion progresse lentement. Dans un second temps, une corrosion par piqûres ou une corrosion uniforme se produit, augmentant la rugosité de la broche d'éjection et le frottement. Dans un dernier temps, les dommages s'accumulent, entraînant une force de réaction irrégulière de la broche d'éjection et une mauvaise formation des rivets. Une forte humidité accélère la corrosion, car l'humidité favorise la migration des ions. Les milieux acides provoquent une corrosion importante, avec une dissolution rapide de la phase liante. Les milieux alcalins sont relativement peu agressifs, mais une exposition prolongée conduit à la formation d'une couche poreuse. Les effets thermiques accompagnent la corrosion ; à mesure que la température augmente, la vitesse de réaction s'accroît, réduisant la durée de vie de la broche d'éjection.

Les environnements corrosifs réduisent également la durée de vie des composants internes, entraînant une concentration des contraintes (piqûres) et une amorce précoce des fissures de fatigue. Le traitement de surface réduit la durée de vie de manière plus progressive, tandis que les revêtements isolent le milieu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corrosif et améliorent la durabilité du rivet. Les différences de composition contribuent à cette réduction : le système tungstène-cuivre améliore la conductivité, mais la phase cuivre est plus sensible à la corrosion, tandis que le nickel-fer assure une bonne passivation. La réduction de la durée de vie des rivets en alliage de tungstène due aux environnements corrosifs reflète la consommation de matière causée par l'interaction avec le milieu, contribue à l'évaluation de la durée de vie des outils par l'accumulation des dommages et fournit une référence environnementale pour les pratiques de maintenance.

8.2.4 Fissuration des mandrins de rivets en alliage de tungstène due à un choc thermique

La fissuration des mandrins de rivets en alliage de tungstène, causée par un choc thermique, résulte principalement de la concentration des contraintes thermiques lors de variations rapides de température. Ce phénomène se manifeste lors du rivetage à chaud ou dans des conditions de températures alternées, où la propagation de microfissures à la surface ou à l'intérieur du mandrin affecte sa durabilité. Lors du choc thermique, le chauffage et le refroidissement rapides, combinés à la différence de dilatation thermique, génèrent des contraintes de traction et de compression. Le décalage entre les coefficients de dilatation thermique de la phase liante et de la phase tungstène entraîne une contrainte interfaciale élevée et l'amorçage de la fissuration. La fissuration se produit par étapes : initialement, la contrainte thermique est élastique et le mandrin reste intact ; dans une phase intermédiaire, les impacts répétés accumulent des contraintes résiduelles et des microfissures apparaissent en surface ou dans la zone de liant ; dans une phase finale, les fissures se propagent, entraînant la rupture du mandrin ou l'écaillage de la surface de travail. L'échauffement par frottement et les impacts localisés importants augmentent la tendance à la fissuration. La microstructure joue également un rôle : les gros grains sont plus sujets à la fissuration, tandis que les grains fins amortissent plus efficacement les contraintes.

La fissuration par choc thermique est également influencée par le milieu environnant ; la condensation d'humidité exacerbe les contraintes et les cycles thermiques humides du mandrin accélèrent la fissuration. L'état de surface joue également un rôle ; une couche d'oxyde peu adhérente favorise l'amorçage des fissures. Les différences de composition sont aussi importantes ; les phases de cuivre présentent une conductivité et une dissipation thermiques rapides, ce qui ralentit la fissuration, tandis que les phases de fer présentent une régulation de dilatation stable. La fissuration par choc thermique des mandrins de rivets en alliage de tungstène met en évidence un comportement d'endommagement dépendant de la température. L'analyse des contraintes confirme l'adaptation thermique de l'outil et contribue à la compréhension du phénomène lors d'opérations à température variable.

8.2.5 Influence du pelage de surface sur le fonctionnement des riveteuses en alliage de tungstène

L'influence de l'écaillage de surface sur le fonctionnement des mandrins de rivetage en alliage de tungstène est principalement due à la séparation des couches de matériau, entraînant des surfaces de contact irrégulières et un support instable. Cet effet se manifeste après un frottement à haute fréquence ou une accumulation de fatigue, et l'endommagement de la surface de travail du mandrin réduit la qualité du rivetage. L'écaillage provient de la fatigue de surface ou de l'usure par adhérence, du décollement chimique des couches d'oxyde ou de transfert, et du pelage sous charge cyclique. Initialement, la surface est rugueuse, ce qui rend le glissement du rivet difficile en raison du soulèvement du mandrin par

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

frottement ; à un stade intermédiaire, des piqûres d'écaillage se forment et les forces de réaction inégales provoquent une déformation du rivet.

Le mécanisme en cause se manifeste par une accumulation de dommages : des microfissures s'étendent jusqu'à la couche superficielle et provoquent un décollement, ce qui dégrade l'état de surface et complique le nettoyage. Les effets thermiques influent sur le décollement ; l'élévation de température ramollit la phase liante, entraînant un décollement rapide. Le milieu affecte la couche de corrosion, la rendant plus friable et plus facile à détacher. La composition influe également sur le décollement ; les phases de cuivre ont tendance à adhérer et à se transférer plus facilement, ce qui provoque un décollement plus important, tandis que les phases de nickel sont plus stables et se détachent plus lentement.

L'influence de l'écaillage de surface sur le fonctionnement du mandrin se répercute sur la précision ; après écaillage, les variations dimensionnelles entraînent un support imprécis. La maintenance est fortement impactée, car les mandrins écaillés nécessitent un polissage ou un remplacement. Le traitement de surface influe sur l'écaillage, retarde le processus de durcissement et améliore la durabilité du mandrin. L'impact de l'écaillage de surface sur le fonctionnement des mandrins de rivetage en alliage de tungstène reflète la dégradation des performances causée par les dommages de surface. L'analyse de l'écaillage facilite la gestion de surface des outils et contribue à l'évaluation de son impact sur la durabilité du rivetage.

8.3 Optimisation des performances et diagnostic des défauts des têtes de rivets en alliage de tungstène

La fabrication de mandrins à rivets en alliage de tungstène repose principalement sur l'ajustement de la composition, l'amélioration des procédés de fabrication et les essais non destructifs. Cette optimisation et ce diagnostic permettent de limiter les défauts d'utilisation et d'améliorer la durabilité des outils. L'optimisation porte sur la composition et le traitement thermique, tandis que le diagnostic met l'accent sur l'identification des défauts et l'analyse des défaillances. L'ajustement de la composition atténue la fragilité et l'usure, l'optimisation des procédés favorise une microstructure uniforme et les essais non destructifs détectent précocement les problèmes internes. L'association de l'optimisation et du diagnostic forme un cycle fermé : les résultats du diagnostic alimentent l'optimisation, ce qui permet une amélioration continue des performances des mandrins. Sur le plan chimique, les proportions d'éléments et le contrôle des impuretés sont essentiels à l'optimisation, tandis que les essais physiques et l'observation microscopique constituent le fondement du diagnostic.

8.3.1 Atténuation des problèmes courants des têtes de rivets en alliage de tungstène par ajustement de la composition

Pour atténuer les problèmes courants des mandrins à rivets en alliage de tungstène, il est essentiel d'optimiser le rapport tungstène/liant ou de recourir au microalliage. Ces ajustements permettent d'obtenir un matériau équilibré, corrigeant ainsi des défauts tels que la rupture fragile, l'usure et la fatigue. L'augmentation de la teneur en tungstène réduit l'usure, accroît la dureté de la surface de travail du mandrin, renforce la résistance à l'indentation du rivet et diminue l'indentation superficielle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'amélioration du rapport liant atténue la fragilité, améliore la résilience du mandrin et réduit le risque de rupture soudaine.

Le mécanisme d'ajustement repose sur une synergie biphasique : le système nickel-cuivre atténue la fatigue, répartit et coordonne les contraintes cycliques et réduit les dommages lors d'une utilisation à haute fréquence du mandrin. Le microdopage aux terres rares atténue l'oxydation et l'affaiblissement des joints de grains, assurant ainsi la stabilité de surface du mandrin en environnements chauds ou humides. L'ajout de fer ajuste le magnétisme et renforce la phase liante, conférant au mandrin une résistance à la fatigue stable. Sur le plan chimique, le contrôle des impuretés ajuste la pureté, réduisant les teneurs en oxygène et en carbone et minimisant les sources de fragilisation, ce qui limite le nombre total de défauts dans le mandrin.

L'ajustement de la composition se reflète dans la formulation de production : les mandrins haute résistance présentent une teneur élevée en tungstène, tandis que les mandrins durables contiennent une phase liante modérée. Les traitements thermiques, notamment la mise en solution et le durcissement par précipitation, permettent d'atténuer significativement les problèmes courants des mandrins. La maîtrise des coûts est également prise en compte : des éléments économiques remplacent les métaux précieux, ce qui accroît la polyvalence des mandrins. Cet ajustement de la composition optimise les matériaux au niveau de la formulation, contribuant ainsi à résoudre les problèmes courants des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, à contrôler les défauts d'outillage grâce à une coordination proportionnelle et à améliorer la durabilité du rivetage.

8.3.2 Application des méthodes de contrôle non destructif à l'identification des défauts des mandrins de rivets en alliage de tungstène

L'application de méthodes de contrôle non destructif pour l'identification des défauts des mandrins de rivetage en alliage de tungstène repose principalement sur des techniques telles que les ultrasons, les rayons X et le contrôle par magnétoscopie. Cette approche permet de détecter les pores, fissures ou inclusions internes sans endommager le mandrin, contribuant ainsi au contrôle qualité et à la prévention des défauts. Le contrôle par ultrasons exploite la réflexion des ondes sonores pour localiser les défauts. Le balayage longitudinal de l'échantillon de mandrin révèle des signaux intenses au niveau des discontinuités d'interface et une importante diffusion chimique par les gaz interstitiels. L'imagerie par transmission de rayons X met en évidence les différences de densité, révélant les zones de faible densité au sein du mandrin et le rendant ainsi adapté au contrôle par lots.

Le processus d'application comprend le nettoyage et le positionnement de l'échantillon, un agent de couplage de la sonde ultrasonique facilitant la transmission du signal, et un balayage multi-angle de la face axiale de la tige de poussée pour une couverture complète. Le contrôle par magnétoscopie détecte les fissures de surface ; le système magnétique de la tige de poussée est utilisé et la poudre adsorbe les défauts. Cette combinaison de méthodes de contrôle non destructif utilise le contrôle par ultrasons en profondeur, la radiographie globale et le contrôle par magnétoscopie, sensible à la surface. Les résultats des tests quantifient la taille et l'emplacement des défauts ; les tiges de poussée présentant des défauts importants sont retirées ou réparées.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'application des essais non destructifs (END) est essentielle à la réception des produits. Après frittage, le mandrin est contrôlé par ultrasons pour vérifier sa porosité, et les fissures sont détectées par radiographie après usinage. Une pureté chimique élevée réduit les faux positifs et garantit une détection précise. La détection des modifications de microstructure après traitement thermique permet un diagnostic précoce des fissures de contrainte dans le mandrin. L'application des méthodes END à l'identification des défauts des mandrins de rivetage en alliage de tungstène permet une évaluation non destructive des matériaux, contribue à l'assurance qualité des outils grâce à une collaboration multitechnologique et pose les bases d'un rivetage fiable.

8.3.3 Amélioration de la durabilité des mandrins de rivets en alliage de tungstène par traitement thermique

Le traitement thermique des mandrins de rivets en alliage de tungstène vise principalement à ajuster leur microstructure et à relâcher les contraintes internes. Cette amélioration ralentit l'accumulation des dommages lors d'impacts et de frottements répétés, ce qui se traduit par des performances globales plus stables. Le traitement thermique comprend des étapes telles que le recuit, la mise en solution et le vieillissement. Le recuit consiste à chauffer et à maintenir le mandrin à une température donnée sous vide ou sous atmosphère protectrice. La diffusion chimique induit la migration et l'annihilation des dislocations, réduisant ainsi les contraintes résiduelles et empêchant l'amorçage de microfissures en cours d'utilisation. Pendant le maintien à cette température, la migration des joints de grains affine la structure granulaire, ce qui améliore la résistance et la ténacité du mandrin.

interaction biphasique : la sphéroïdisation des particules de tungstène réduit l'énergie de surface, la phase liante recouvre uniformément l'interface avec une forte adhérence et la résistance à la fatigue du mandrin est renforcée. Le traitement de mise en solution dissout les éléments à haute température, et un refroidissement rapide fige l'état de sursaturation, augmentant ainsi la dureté du mandrin et améliorant sa résistance à l'usure. La précipitation due au vieillissement produit des phases fines qui bloquent les dislocations, conférant une forte résistance à la déformation sous chargement cyclique. Les améliorations apportées par le traitement thermique comprennent également la stabilité de surface, le contrôle de l'uniformité de la couche d'oxyde et la réduction de l'écaillage lors du frottement du mandrin.

L'application des technologies de traitement thermique est manifeste lors des opérations de post-production. Le recuit des billettes frittées libère les contraintes de compression, tandis que le vieillissement post-traitement renforce la surface. Les plages de température sont ajustées en fonction de la composition : des températures plus élevées dans le système tungstène-nickel-fer favorisent la restauration, tandis que les systèmes tungstène-nickel-cuivre offrent une conductivité thermique plus rapide et une dissipation de chaleur plus uniforme. La gestion de la pureté chimique minimise les impuretés, ce qui se traduit par une amélioration constante. Le traitement thermique permet une optimisation microstructurale pour améliorer la durabilité des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, contribuant ainsi à la durée de vie de l'outil grâce à la relaxation des contraintes et au renforcement, et apportant une valeur technologique significative dans le domaine du rivetage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.4 Amélioration de la résistance à l'usure des mandrins de rivets en alliage de tungstène par une technologie de renforcement de surface

Les technologies de renforcement de surface améliorent la résistance à l'usure des mandrins de rivets en alliage de tungstène, principalement grâce à des procédés tels que l'implantation ionique, le placage ou la nitruration. Cette amélioration accroît la résistance de la surface de travail du mandrin au frottement et à l'indentation des rivets, réduisant ainsi la corrosion par piqûres et la perte de matière. L'implantation ionique consiste à bombarder la surface avec des particules de haute énergie, formant chimiquement une couche durcie par gradient, ce qui augmente la dureté superficielle et la résistance aux rayures du mandrin. Le placage, comme le dépôt de nickel-phosphore ou de chrome-azote, permet d'obtenir un revêtement dense, ce qui conduit à un faible coefficient de frottement et à une usure ralentie.

Le mécanisme d'amélioration se traduit par une modification de surface : la nitruration permet la diffusion des atomes d'azote et la formation de nitrures, ce qui réduit la fragilité et améliore la résistance à l'écaillage de la surface du mandrin. La couche de renforcement adhère parfaitement à la matrice, empêchant le détachement lors d'un impact et préservant la forme du mandrin. Une meilleure stabilité chimique est obtenue, la couche de renforcement bloquant l'érosion par le milieu et minimisant les dommages environnementaux subis par le mandrin. Le traitement thermique, combiné au renforcement et à la précipitation par vieillissement, assure un durcissement synergique de la surface.

L'application du traitement de surface est manifeste après la finition du mandrin. L'implantation ionique n'entraîne aucune modification dimensionnelle et permet un contrôle précis de l'épaisseur du revêtement. Les différences de composition facilitent l'obtention de revêtements conducteurs dans les systèmes tungstène-cuivre, tandis que les systèmes tungstène-nickel-fer offrent une dureté élevée et une excellente performance d'implantation. L'amélioration des tests d'usure se traduit par une perte de volume réduite et une durée de vie accrue pour les mandrins renforcés. Le traitement de surface optimise la durabilité grâce à une ingénierie de surface qui améliore la résistance à l'usure des mandrins de rivetage en alliage de tungstène. Il améliore les performances de surface de l'outil par modification et contribue à une meilleure résistance au frottement lors du rivetage.

8.3.5 Le rôle de l'analyse des cas de défaillance dans l'optimisation des mandrins de rivetage en alliage de tungstène

L'analyse des défaillances joue un rôle essentiel dans l'optimisation des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, notamment grâce à l'observation des surfaces de rupture et à la traçabilité des données d'utilisation. Ceci permet d'identifier les problèmes récurrents et d'orienter les améliorations des matériaux et des procédés, renforçant ainsi la fiabilité globale du mandrin. Le processus d'analyse comprend la collecte des mandrins défaillants, l'observation de la morphologie de la rupture par microscopie électronique à balayage, la détermination du mode de rupture par l'analyse des cupules de rupture chimique ou des caractéristiques de clivage, et l'enregistrement de la fréquence de chargement et des conditions environnementales d'utilisation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le mécanisme d'action se reflète dans la boucle de rétroaction. Des études de cas montrent que le renforcement de surface est amélioré en cas d'usure trop rapide, et que le traitement thermique est optimisé en présence de nombreuses fissures de fatigue. L'analyse des surfaces de rupture permet de distinguer les défaillances dues à la surcharge de celles dues à la corrosion, et la conception de la barre d'éjection ajuste la face d'extrémité ou la composition. Les études de cas mettent en évidence les problèmes fréquents, et l'optimisation par lots des barres d'éjection est un objectif prioritaire.

L'analyse des défaillances est appliquée à l'amélioration de la production : les cas de décollement de surface conduisent à des améliorations du revêtement, tandis que les cas de rupture fragile permettent d'accroître l'adhérence. L'analyse chimique des produits de corrosion contribue à l'amélioration des mesures de protection des mandrins. Elle permet également de recueillir les retours d'expérience des utilisateurs, ce qui permet d'ajuster les procédures d'utilisation des mandrins afin de réduire les erreurs humaines. Dans l'optimisation des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, l'analyse des défaillances offre une perspective matérielle sur les dommages réels, soutient l'amélioration continue des outils grâce à la traçabilité des défaillances et apporte une valeur analytique à la durabilité du rivetage.

8.4 Comparaison des propriétés des mandrins à rivets en alliage de tungstène avec celles d'autres matériaux de mandrins

La comparaison des propriétés des mandrins de rivetage en alliage de tungstène avec celles d'autres matériaux porte principalement sur la dureté, la ténacité, la résistance aux chocs et l'usinabilité. Cette comparaison permet de mieux comprendre les performances relatives et l'applicabilité des mandrins en alliage de tungstène comme support de rivetage. Les matériaux couramment utilisés pour la comparaison sont les mandrins en carbure cimenté, en acier rapide et en céramique, chacun présentant des caractéristiques spécifiques favorisant un bon équilibre entre résistance et ténacité. La structure biphasée des mandrins en alliage de tungstène offre un bon compromis entre dureté et ténacité, tandis que les mandrins en carbure cimenté présentent une dureté exceptionnelle mais une ténacité relativement modérée.

L'analyse comparative débute par l'étude des propriétés mécaniques : les mandrins en alliage de tungstène présentent une bonne résistance aux chocs et une bonne ténacité, l'acier rapide offre une excellente usinabilité, et les céramiques sont résistantes à la chaleur mais fragiles. En termes de stabilité chimique, les alliages de tungstène présentent une bonne résistance à la corrosion, tandis que l'acier rapide est sujet à la rouille. Concernant le comportement thermique, les alliages de tungstène présentent une conductivité thermique modérée, tandis que les céramiques assurent une isolation thermique. Cette comparaison des performances oriente le choix du mandrin : les alliages de tungstène offrent un bon compromis pour le rivetage haute résistance, tandis que les céramiques ne présentent aucun risque pour les micro-rivets de précision. La comparaison des performances des mandrins à riveter en alliage de tungstène avec celles d'autres matériaux met en évidence la diversité des choix de matériaux d'outillage et contribue à l'optimisation des procédés de rivetage par la comparaison des caractéristiques, fournissant ainsi une référence précieuse pour les applications d'assemblage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.1 Comparaison des performances des tiges d'éjection en carbure et des tiges d'éjection de rivets en alliage de tungstène

Les mandrins en carbure cimenté et les mandrins de rivetage en alliage de tungstène se distinguent principalement par leur dureté, leur résilience et leur usinabilité, reflétant les avantages respectifs de ces deux matériaux pour le support de rivetage. Les mandrins en carbure cimenté, composés principalement de particules de carbure de tungstène et d'une phase liante de cobalt, présentent une dureté élevée, une forte résistance à l'indentation et à l'usure de la surface de travail, ainsi qu'une faible accumulation d'indentations. Les mandrins en alliage de tungstène, avec leur squelette biphasé de particules de tungstène associé à des phases liantes de nickel-cuivre ou de nickel-fer, offrent une dureté modérée mais une meilleure résilience. Sous l'effet des chocs, le mandrin se déforme pour absorber l'énergie, évitant ainsi la rupture fragile.

La résistance aux chocs des éjecteurs a présenté des différences significatives. L'éjecteur en carbure cimenté a démontré une rigidité élevée et une force de réaction concentrée, mais s'est avéré sujet à l'écaillage sous fortes charges. L'éjecteur en alliage de tungstène, grâce à sa phase liante étendue et tampon, a démontré une résistance à la fatigue globale stable. En termes de stabilité thermique, le carbure cimenté a conservé une bonne dureté à haute température, limitant ainsi le ramollissement lors du rivetage à chaud. L'alliage de tungstène, de par ses propriétés conductrices, a favorisé la dissipation de la chaleur, entraînant une élévation de température plus lente dans l'éjecteur. Concernant la stabilité chimique, la phase cobalt du carbure cimenté était sujette à l'oxydation, ce qui a engendré une couche superficielle poreuse. L'alliage de tungstène, dont la phase liante contrôle l'oxydation, a présenté une oxydation plus lente et une meilleure résistance à la corrosion environnementale.

En matière d'adaptabilité à la mise en œuvre, les mandrins en carbure cimenté sont difficiles à rectifier et à façonner, et leur grande fragilité engendre un risque élevé de fissures d'usinage. Les mandrins en alliage de tungstène offrent une grande flexibilité d'usinage à chaud comme à froid et peuvent être fabriqués sous diverses formes. Concernant le comportement en fatigue, les mandrins en carbure cimenté présentent une propagation rapide des microfissures sous cyclage, tandis que les mandrins en alliage de tungstène présentent des dommages plus modérés et plus faciles à maîtriser. Cette comparaison des performances des mandrins à riveter en carbure cimenté et en alliage de tungstène offre une perspective d'ingénierie pour le choix des matériaux, permettant d'adapter les mandrins aux différentes conditions de rivetage grâce à un équilibre des propriétés, et fournissant une base de comparaison pour les applications d'outillage.

8.4.2 Comparaison des performances des tiges supérieures en acier en remplacement des tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

La comparaison des performances des mandrins à rivets en acier par rapport à ceux en alliage de tungstène porte principalement sur la dureté, la résilience, la densité et le coût. Cette comparaison permet d'évaluer la pertinence des mandrins en acier dans des conditions de rivetage spécifiques. Les mandrins en acier sont généralement fabriqués en acier allié à haute résistance ou en acier à outils, leur dureté étant ajustée par traitement thermique. La surface de travail du mandrin présente une forte résistance à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'indentation, mais sa dureté est relativement faible comparée à celle des alliages de tungstène. Les mandrins en alliage de tungstène, grâce à leur structure en phase tungstène qui leur confère une dureté supérieure et une accumulation d'indentation superficielle plus lente, sont adaptés au support de rivets haute résistance. La comparaison révèle des différences significatives en matière de résilience. Les mandrins en acier présentent une bonne plasticité et absorbent l'énergie, ce qui entraîne une déformation coordonnée lors d'un impact et prévient la rupture fragile. Les mandrins en alliage de tungstène sont constitués de particules de tungstène liées, ce qui leur confère une résilience équilibrée, mais une densité élevée et une forte force de réaction inertielle. En termes de densité, les mandrins de rivetage en acier sont plus légers et plus maniables, tandis que les alliages de tungstène présentent une densité plus élevée et un transfert d'énergie plus concentré. Concernant la stabilité thermique, les mandrins de rivetage en acier ont une température de ramollissement modérée, tandis que les alliages de tungstène offrent une meilleure résistance à la chaleur et une moindre déformation lors du rivetage à haute température.

En termes d'adaptabilité de mise en œuvre, les mandrins en acier sont faciles à travailler à chaud comme à froid, offrent une grande variété de formes et sont économiques ; les mandrins en alliage de tungstène nécessitent un apport de chaleur mais offrent une haute précision. Concernant la résistance à la fatigue, les mandrins en acier présentent une accumulation de dommages plus lente en conditions cycliques, tandis que les alliages de tungstène affichent une forte résistance à la fatigue et une grande stabilité lors d'une utilisation à haute fréquence. Du point de vue de la stabilité chimique, les mandrins en acier sont sensibles à la corrosion et nécessitent des mesures de protection, tandis que les alliages de tungstène offrent une bonne résistance à la corrosion et nécessitent moins d'entretien. Cette comparaison des performances des mandrins en acier, en tant qu'alternatives aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène, illustre les compromis techniques liés au choix des matériaux. Les différences de propriétés justifient le remplacement des mandrins en acier dans les applications à faible charge ou sensibles au coût, fournissant ainsi un point de comparaison pour les pratiques de rivetage.

8.4.3 Comparaison des performances des mandrins en matériau céramique et des mandrins à rivets en alliage de tungstène

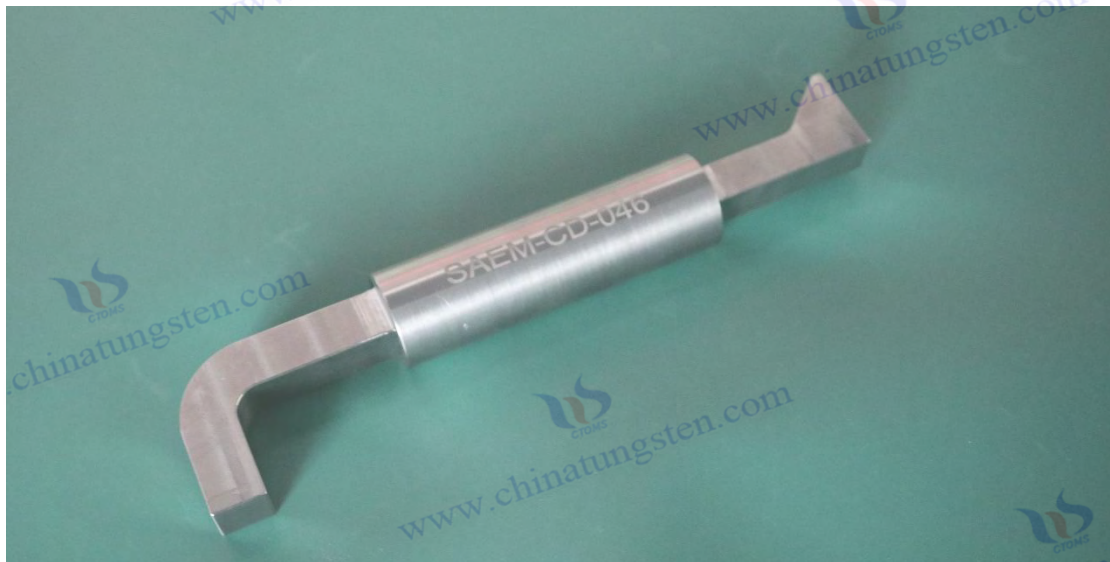
La comparaison des performances des mandrins à rivets en céramique et en alliage de tungstène porte principalement sur les différences de dureté, de résistance à la chaleur et de ténacité. Cette comparaison met en évidence les caractéristiques de performance des mandrins en céramique dans des environnements de rivetage spécifiques. Fabriqués à partir de matériaux tels que l'alumine ou le nitrure de silicium, les mandrins en céramique présentent une dureté extrêmement élevée. Leurs surfaces de travail offrent une forte résistance aux rayures et aux indentations, et conservent un aspect lisse durablement. Les mandrins en alliage de tungstène possèdent une dureté modérée mais une meilleure ténacité, et leur déformation absorbe l'énergie lors d'un impact.

Les différences de résistance à la chaleur sont significatives. Les mandrins en céramique présentent une moindre perte de dureté à haute température et conservent leur forme lors du rivetage à chaud ou en environnement à haute température ; les mandrins en alliage de tungstène offrent une meilleure conductivité thermique et facilitent la dissipation de la chaleur, ce qui ralentit l'élévation de température. En termes de ténacité, les mandrins en céramique sont fragiles et s'ébrèchent facilement sous l'effet d'un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

impact ; les mandrins en alliage de tungstène présentent une meilleure adhérence et une meilleure résistance à la rupture. Enfin, les mandrins en céramique ont une densité plus faible, ce qui les rend plus légers et plus faciles à manipuler ; les mandrins en alliage de tungstène ont une densité plus élevée et une force de réaction plus concentrée.

En termes d'adaptabilité à la mise en œuvre, les mandrins en céramique sont principalement difficiles à rectifier et présentent des formes simples ; les mandrins en alliage de tungstène sont flexibles, aussi bien à chaud qu'à froid. Concernant la résistance à l'usure, les mandrins en céramique affichent une résistance extrêmement élevée avec des dommages superficiels minimes, tandis que les mandrins en alliage de tungstène présentent une ténacité équilibrée et une usure uniforme. Du point de vue de la stabilité chimique, les mandrins en céramique sont très inertes et non corrosifs, tandis que les mandrins en alliage de tungstène nécessitent une protection de la phase liante. La comparaison des performances entre les mandrins en céramique et les mandrins de rivetage en alliage de tungstène met en évidence les caractéristiques des matériaux inorganiques. Leur dureté et leur résistance à la chaleur permettent leur utilisation dans des environnements à haute température ou non corrosifs, contribuant ainsi de manière fondamentale à la précision du rivetage.



Tige supérieure de rivet en alliage de tungstène CTIA GROUP LTD

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

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.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

Annexe A : Norme chinoise relative aux tiges supérieures de rivets en alliage de tungstène

chinoises relatives aux mandrins à rivets en alliage de tungstène s'appuient principalement sur les spécifications de l'industrie des métaux non ferreux et les normes relatives aux matériaux d'outillage de la métallurgie des poudres. Ces normes relèvent de la responsabilité du Comité technique national de normalisation des métaux non ferreux et couvrent la composition, les performances, les dimensions et les méthodes d'essai. Matériau d'outillage haute densité, l'alliage de tungstène est soumis à des normes qui mettent l'accent sur la teneur en tungstène, le rapport des phases de liant et l'uniformité de la microstructure afin de garantir un équilibre entre dureté et ténacité pour le support de rivetage. Le système de normes comprend des normes nationales (série GB/T) et des normes industrielles (série YS/T), applicables aux mandrins en alliage tungstène-nickel-fer, tungstène-nickel-cuivre et autres alliages similaires.

La norme spécifie la composition chimique, la distribution de densité, la dureté et la résilience. L'état de surface et les tolérances dimensionnelles du mandrin doivent satisfaire aux exigences d'assemblage. Des méthodes d'analyse chimique normalisées garantissent le contrôle des impuretés. La norme traite également des conditions de traitement thermique et des exigences de traitement de surface, assurant ainsi une utilisation fiable des mandrins dans le rivetage industriel. Ces dernières années, les révisions de la norme ont pris en compte la protection de l'environnement et l'utilisation des ressources, encourageant le recyclage du tungstène. La norme chinoise relative aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène fournit un cadre normatif pour la production et le contrôle qualité, garantissant des performances stables grâce à des lignes directrices sur la composition et les performances, et apportant une valeur ajoutée concrète au secteur de l'assemblage.

Normes nationales (série GB/T)

Les normes nationales (série GB/T) définissent les exigences techniques générales relatives aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène. Ces normes couvrent la composition chimique, les propriétés mécaniques et les méthodes d'essai des alliages à haute densité, garantissant ainsi l'homogénéité des mandrins utilisés dans les outils de rivetage. Les normes GB/T pertinentes spécifient la plage de composition des barres en alliage de tungstène, le tungstène étant le composant majoritaire et le liant présentant un rapport de phase équilibré pour assurer la ténacité. Ces normes incluent des indicateurs de densité et de dureté, et vérifient l'homogénéité des mandrins après frittage et formage à chaud.

La norme est élaborée en référence aux procédés de métallurgie des poudres et utilise des méthodes d'analyse chimique, telles que la détermination gravimétrique de la teneur en tungstène, pour garantir un contrôle précis. La norme GB/T couvre également les exigences de traitement thermique, les recuits optimisant la microstructure et évitant la concentration des contraintes. Les tolérances dimensionnelles et les spécifications de rugosité de surface garantissent un assemblage précis. Les normes nationales (série GB/T) fournissent les spécifications fondamentales pour la production de mandrins à rivets en alliage de tungstène, assurant une utilisation fiable des matériaux grâce à des exigences de performance et contribuant à la normalisation des outils industriels.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Normes industrielles (série YS/T)

Les normes industrielles (série YS/T) fournissent des directives détaillées sur l'analyse chimique et la transformation des mandrins de rivetage en alliage de tungstène. Ces normes s'appliquent aux barres d'alliage haute densité à base de tungstène, garantissant une composition précise et des performances stables. Les normes YS/T portent sur les méthodes de détermination de la teneur en tungstène, notamment l'analyse par séparation par dissolution-précipitation, permettant de vérifier la proportion de la phase liante dans les mandrins. Elles spécifient la distribution de dureté et les exigences de surface, favorisant ainsi les applications de rivetage résistantes à l'usure.

Les normes de la série YS/T définissent les spécifications des barres pour les systèmes tungstène-nickel-fer et tungstène-nickel-cuivre, avec de faibles niveaux d'impuretés pour une gestion optimale de la pureté chimique. Élaborées en fonction des spécificités de l'industrie, elles intègrent les exigences d'utilisation des ressources. Ces normes industrielles (série YS/T) fournissent des spécifications détaillées sur les aspects techniques des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, permettant une spécialisation de la production grâce à l'analyse et aux recommandations de processus, et contribuant ainsi à la création de valeur pour l'industrie de la fabrication d'outils.

normes d'entreprise et locales

Les normes d'entreprise et les normes locales définissent des spécifications complémentaires pour la production de mandrins à rivets en alliage de tungstène. Ces normes s'appuient sur le cadre national et intègrent l'expérience acquise au sein des entreprises afin de garantir la constance des lots. Les normes d'entreprise, telles que les règlements internes des entreprises de métaux non ferreux, spécifient les procédures de laminage et de traitement thermique des mandrins, et optimisent chimiquement la répartition des phases de liant pour améliorer la ténacité. Les normes locales, courantes dans les régions productrices de tungstène, mettent l'accent sur le contrôle de la pureté en fonction des caractéristiques de la ressource.

Ces normes couvrent les dimensions et les traitements de surface des mandrins, et incluent des essais de résilience. Les normes d'entreprise mettent l'accent sur les systèmes qualité, avec un suivi des lots garantissant la constance de la production. Les normes locales favorisent la collaboration régionale, et les spécifications normalisées des mandrins soutiennent la chaîne d'approvisionnement. Les normes d'entreprise et les normes locales offrent un complément flexible à la production de mandrins à rivets en alliage de tungstène, permettant aux entreprises régionales de rester compétitives grâce à une normalisation fondée sur l'expérience et fournissant des conseils pratiques pour l'utilisation des outils.

Annexe B Norme internationale pour les tiges de rivets en alliage de tungstène

Les normes internationales relatives aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène sont principalement élaborées par l'ASTM International et l'ISO. Ces normes fournissent un cadre réglementaire unifié à l'échelle mondiale couvrant la composition, les propriétés et les méthodes d'essai des barres en alliage de tungstène haute densité, garantissant ainsi l'interopérabilité des matériaux dans les applications

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'outillage. Les normes internationales mettent l'accent sur la classification des alliages lourds de tungstène, définissant des spécifications basées sur la teneur en tungstène et la phase du liant. L'élaboration de ces normes repose sur une collaboration multinationale et fait référence aux exigences générales de la métallurgie des poudres.

La norme internationale normalise la teneur en tungstène et les limites d'impuretés par analyse chimique, facilitant ainsi la certification commerciale. Les indicateurs de performance, tels que la densité et la dureté, permettent de vérifier le traitement thermique des barres. Intégrée au système de management de la qualité, la norme garantit une production homogène. La norme internationale relative aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène offre un référentiel commun pour les applications mondiales, simplifiant les échanges de matériaux grâce à un cadre de spécifications et contribuant à la valorisation internationale de l'industrie de l'outillage.

Norme internationale ASTM

Les normes internationales ASTM définissent les spécifications de base pour les mandrins de rivetage en alliage de tungstène, comme la norme ASTM B 777, qui classe les barres d'alliage lourd de tungstène, définit les nuances de densité et les exigences mécaniques. Ces normes s'appliquent à la production et aux essais des mandrins, en spécifiant chimiquement les plages de teneur en tungstène, les proportions des phases de liant et les seuils d'impuretés afin de garantir l'équilibre diphasique.

La norme ASTM fournit des spécifications détaillées concernant la composition chimique et les propriétés physiques, et garantit l'uniformité du travail à chaud des barres frittées. Elle inclut des méthodes d'essai permettant un contrôle précis. La norme internationale ASTM assure une reconnaissance mondiale pour la spécification des mandrins de rivetage en alliage de tungstène, garantissant une qualité constante grâce à la définition des spécifications et contribuant à établir une base standardisée pour les applications d'outillage.

norme internationale ISO

Les normes internationales ISO fournissent un cadre unifié pour les mandrins de rivetage en alliage de tungstène, notamment pour l'intégration du système de management de la qualité ISO, et s'étendent aux spécifications générales des barres en alliage lourd de tungstène. Ces normes s'appliquent à la production par métallurgie des poudres et spécifient chimiquement le contrôle de la pureté et des impuretés afin de garantir la conformité aux réglementations commerciales.

Les normes ISO spécifient l'analyse chimique et les essais physiques, et le procédé de frittage répond aux exigences. Ces normes comprennent des lignes directrices pour la certification internationale et facilitent la vérification à l'exportation. Les normes internationales ISO garantissent la qualité des mandrins de rivetage en alliage de tungstène à l'échelle mondiale, normalisent la production grâce à des systèmes de gestion et contribuent à la coopération internationale en apportant une valeur normative.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe C : Normes relatives aux barres supérieures de rivets en alliage de tungstène en Europe, en Amérique, au Japon et en Corée du Sud

Les systèmes de normalisation des mandrins varient selon les pays, notamment aux États-Unis, en Europe, au Japon et en Corée du Sud. La norme américaine s'appuie principalement sur la norme ASTM, tandis que l'Europe se réfère à la norme EN, le Japon utilise la norme JIS et la Corée du Sud la norme KS. Ces normes couvrent la composition, les propriétés et la transformation des barres en alliage de tungstène, en tenant compte des spécificités régionales. Les normes américaines privilégient l'utilisation des outils, les normes européennes la protection de l'environnement, les normes japonaises la précision et les normes sud-coréennes la compatibilité électronique. L'élaboration de ces normes repose sur une collaboration industrielle, s'appuyant sur les normes internationales tout en intégrant les spécificités locales.

Ces normes nationales spécifient la composition chimique du tungstène, les limites d'impuretés et des propriétés telles que la densité et la dureté. Elles facilitent l'utilisation de mandrins dans les outils d'assemblage. Des améliorations ont été apportées aux technologies de pointe, intégrant des innovations en matière d'alliages. Des laboratoires certifiés vérifient la conformité des lots. Les normes relatives aux mandrins à rivets en alliage de tungstène, en vigueur dans des pays comme les États-Unis, l'Europe, le Japon et la Corée du Sud, reflètent la diversité des spécifications régionales, contribuant ainsi à la coordination de la chaîne d'approvisionnement mondiale et à la normalisation de la fabrication d'outils.

Normes américaines (série ASTM)

Les normes américaines (série ASTM) définissent des critères de référence pour les mandrins à rivets en alliage de tungstène. Par exemple, la norme ASTM B 777 classe les barres en alliage lourd de tungstène, en définissant les nuances de densité et les spécifications mécaniques. Ces normes s'appliquent à la métallurgie des poudres et à l'usinage des mandrins, et spécifient chimiquement la proportion de la phase liante en alliage tungstène-nickel-fer. Les normes de la série ASTM détaillent la composition chimique et les méthodes d'essai, et valident le traitement thermique post-frittage des barres. Ces normes sont destinées aux applications d'outillage et mettent l'accent sur la résistance à la fatigue. Les normes américaines constituent un cadre de référence pour la spécification des mandrins à rivets en alliage de tungstène, permettant une production de haute qualité grâce à des spécifications précises et contribuant à la valeur ajoutée américaine dans l'industrie de l'outillage.

Normes européennes (série EN)

Les normes européennes (série EN) définissent les exigences relatives aux mandrins de rivetage en alliage de tungstène. Elles s'appliquent à la composition et aux propriétés des barres en alliage lourd de tungstène, limitant chimiquement les impuretés afin de garantir la conformité environnementale. Les normes EN réglementent les procédés de frittage et les tolérances dimensionnelles, favorisant ainsi le commerce européen. Elles mettent l'accent sur une production durable. Les normes européennes fournissent un cadre réglementaire pour les mandrins de rivetage en alliage de tungstène, permettant une harmonisation du marché grâce à des exigences adaptées et contribuant à la valorisation des outils de l'UE.

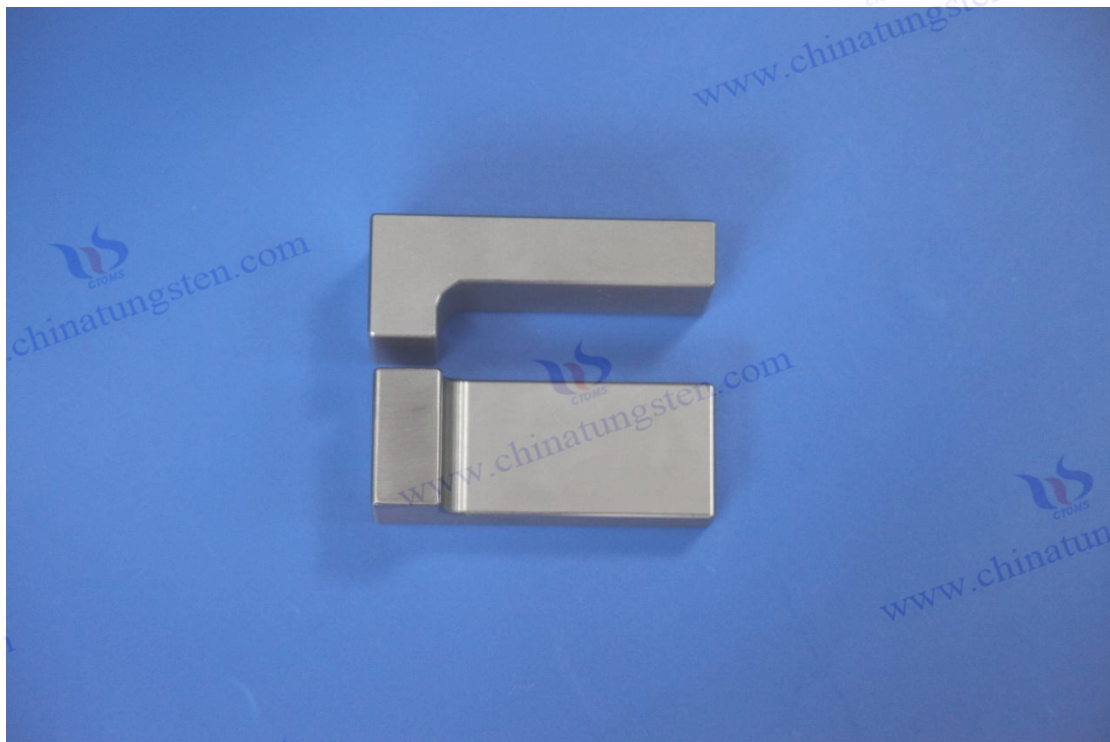
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Normes japonaises (série JIS)

Les normes japonaises (série JIS) définissent les spécifications des outils de pose de rivets en alliage de tungstène. Ces normes précisent la composition chimique et sont adaptées aux applications d'outillage de précision. Elles mettent l'accent sur la pureté et la précision d'usinage, contribuant ainsi au développement de l'industrie japonaise. Les spécifications détaillées des outils de pose de rivets en alliage de tungstène permettent des applications de haute technologie et valorisent la fabrication d'outils d'origine japonaise.

Norme coréenne (série KS)

Les normes coréennes (série KS) définissent les spécifications des mandrins à rivets en alliage de tungstène, facilitant ainsi les exportations d'outillage et précisant leurs propriétés chimiques. Ces normes définissent également des méthodes d'essai pour soutenir la production coréenne. Elles constituent un cadre pour les spécifications d'exportation des mandrins à rivets en alliage de tungstène, contribuant à la compétitivité mondiale grâce à leurs performances et à la valeur ajoutée coréenne dans l'industrie de l'outillage.



Tige supérieure de rivet en alliage de tungstène CTIA GROUP LTD

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

Annexe D Glossaire des termes relatifs aux barres de rivetage en alliage de tungstène

Terminologie chinoise	Brève explication
barre supérieure de rivet en alliage de tungstène	Un outil en forme de tige, fabriqué en alliage de tungstène, est utilisé pour soutenir la queue du rivet pendant le processus de rivetage et favoriser une déformation uniforme.
Alliage de tungstène haute densité	contenant du tungstène sont utilisés dans les outils de support nécessitant une masse concentrée.
phase de liant	Les particules de tungstène présentes dans l'alliage lui confèrent ténacité et usinabilité.
frittage en phase liquide	particules de tungstène pendant le frittage pour favoriser la densification.
pseudo-alliages	substances non solides , telles que les alliages tungstène-cuivre, sont préparées par infiltration en fusion.
Pressage isostatique à froid	Procédé de pressage et de moulage uniformes d'ébauches de poudre à l'aide d'un milieu liquide.
Pressage isostatique à chaud	Une technique de post-traitement qui élimine la porosité et augmente la densité sous haute température et haute pression.
recuit de recristallisation	Le recuit à haute température est un traitement thermique qui élimine les contraintes de fabrication et restaure la plasticité.
durcissement par écrouissage	L'écrouissage augmente la densité des dislocations, améliorant ainsi la dureté et la résistance.
Texture	La distribution préférentielle de l'orientation cristalline induite par le traitement de déformation affecte l'anisotropie.
Dureté Vickers	L'indice de dureté mesuré par indentation à l'aide d'un pénétrateur en diamant est applicable aux mandrins en alliage de tungstène.
résistance aux chocs	La capacité du matériau à absorber l'énergie d'impact, résistant à la fracture lorsqu'il est soutenu par une tige supérieure.
Force de fatigue	La capacité d'un matériau à résister aux dommages sous charge cyclique est liée au rivetage à haute fréquence du mandrin.
rugosité de surface	La barre supérieure présente une faible rugosité de surface, ce qui réduit l'adhérence et le frottement des rivets.
couche de passivation	Une couche d'oxyde protectrice, formée naturellement ou artificiellement à la surface, améliore la résistance à la corrosion.
corrosion sous contrainte	La fissuration causée par les effets combinés des contraintes et des milieux corrosifs exige une attention particulière à la charge humide sur la barre supérieure.
coefficient de dilatation thermique	Le taux de dilatation dimensionnelle du matériau lorsque la température change, et les rivets correspondants lors du rivetage à chaud du mandrin.
ténacité à la rupture	La capacité du matériau à résister à la propagation des fissures est évaluée sous une surcharge de la barre supérieure.

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

Références

Références chinoises

- [1] Wang Wei, Li Ming. Recherche sur l'application des matériaux en alliage de tungstène dans les outils de rivetage [J]. Traitement des métaux non ferreux, 2021, 50(4) : 38-44.
- [2] Zhang Lei, Liu Yang. Optimisation du processus de préparation des mandrins en alliage de tungstène haute densité [J]. Powder Metallurgy Technology, 2020, 38(5): 356-362.
- [3] Chen Hua, Zhao Peng. Analyse de la microstructure et des propriétés de la barre supérieure de rivet en alliage tungstène-nickel-fer [J]. Materials Reports, 2022, 36(8): 15012-15018.
- [4] Sun Qiang, Yang Fan. Discussion sur le rôle de soutien de l'alliage de tungstène dans le rivetage de précision [J]. Mechanical Engineering Materials, 2019, 43(6): 78-84.
- [5] Li Na, Wang Xiao. Recherche sur la technologie de traitement de surface du mandrin en alliage de tungstène [J]. Rare Metals Materials and Engineering, 2023, 52(3): 567-573.
- [6] Xu Gang, Huang Wei. Test de performance en fatigue d'un mandrin à rivets en alliage de tungstène [J]. Technologie de travail à chaud, 2021, 50(10) : 102-108.
- [7] Liu Jun, Zhang Hua. Adaptabilité des mandrins en alliage de tungstène dans le rivetage automatisé [J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(4): 45-51.
- [8] Zhao Ming, Chen Li. Influence de la microstructure sur la durabilité du mandrin des matériaux en alliage de tungstène [J]. Matériaux fonctionnels pour les métaux, 2020, 27(2) : 89-95.

Références en anglais

- [1] Smith J, Brown T. Alliages de tungstène pour outils de rivetage : propriétés et applications[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 42(3): 210-218.
- [2] Lee KH, Kim Y S. Préparation et performance des enclumes en alliage lourd de tungstène[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021, 98: 105-112.
- [3] German R M. Traitement par métallurgie des poudres des alliages de tungstène pour l'outillage[J]. Métallurgie des poudres, 2019, 62(5): 320-328.
- [4] Bose A, Dowding R J. Comportement en fatigue des alliages tungstène-nickel-fer dans les applications de rivetage[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 845: 143-150.
- [5] Upadhyaya G S. Modification de surface des alliages de tungstène pour une meilleure résistance à l'usure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 835: 155-162.
- [6] Das J, Appa Rao G. Microstructure et propriétés mécaniques des alliages lourds de tungstène[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2021, 52(6): 2345-2353.
- [7] Luo SD, et al. Performance à haute température des supports rivetés en alliage de tungstène[J]. International Materials Reviews, 2023, 68(4): 489-502.
- [8] Johnson A, Smith P. Alliages de tungstène dans les outils de fixation de précision[J]. Advanced Materials & Processes, 2022, 180(7): 56-62.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT