

## Cuáles son Barras superiores con remaches de aleación de tungsteno

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Líder mundial en fabricación inteligente para las industrias de tungsteno, molibdeno y tierras raras

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## INTRODUCCIÓN A CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, una subsidiaria de propiedad absoluta con personalidad jurídica independiente establecida por CHINATUNGSTEN ONLINE, se dedica a promover el diseño y la fabricación inteligentes, integrados y flexibles de materiales de tungsteno y molibdeno en la era de Internet industrial. CHINATUNGSTEN ONLINE, fundada en 1997 con [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com) como punto de partida (el primer sitio web de productos de tungsteno de primer nivel de China), es la empresa de comercio electrónico pionera del país centrada en las industrias del tungsteno, el molibdeno y las tierras raras. Aprovechando casi tres décadas de profunda experiencia en los campos del tungsteno y el molibdeno, CTIA GROUP hereda las excepcionales capacidades de diseño y fabricación, los servicios superiores y la reputación comercial global de su empresa matriz, convirtiéndose en un proveedor integral de soluciones de aplicación en los campos de productos químicos de tungsteno, metales de tungsteno, carburos cementados, aleaciones de alta densidad, molibdeno y aleaciones de molibdeno.

En los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha creado más de 200 sitios web profesionales multilingües sobre tungsteno y molibdeno, disponibles en más de 20 idiomas, con más de un millón de páginas de noticias, precios y análisis de mercado relacionados con el tungsteno, el molibdeno y las tierras raras. Desde 2013, su cuenta oficial de WeChat, "CHINATUNGSTEN ONLINE", ha publicado más de 40.000 artículos, atendiendo a casi 100.000 seguidores y proporcionando información gratuita a diario a cientos de miles de profesionales del sector en todo el mundo. Con miles de millones de visitas acumuladas a su sitio web y cuenta oficial, se ha convertido en un centro de información global y de referencia para las industrias del tungsteno, el molibdeno y las tierras raras, ofreciendo noticias multilingües, rendimiento de productos, precios de mercado y servicios de tendencias del mercado 24/7.

Basándose en la tecnología y la experiencia de CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP se centra en satisfacer las necesidades personalizadas de los clientes. Utilizando tecnología de IA, diseña y produce en colaboración con los clientes productos de tungsteno y molibdeno con composiciones químicas y propiedades físicas específicas (como tamaño de partícula, densidad, dureza, resistencia, dimensiones y tolerancias). Ofrece servicios integrales de proceso completo que abarcan desde la apertura del molde y la producción de prueba hasta el acabado, el embalaje y la logística. Durante los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha proporcionado servicios de I+D, diseño y producción para más de 500.000 tipos de productos de tungsteno y molibdeno a más de 130.000 clientes en todo el mundo, sentando las bases para una fabricación personalizada, flexible e inteligente. Con esta base, CTIA GROUP profundiza aún más en la fabricación inteligente y la innovación integrada de materiales de tungsteno y molibdeno en la era del Internet Industrial.

El Dr. Hanns y su equipo en CTIA GROUP, con más de 30 años de experiencia en la industria, han escrito y publicado análisis de conocimiento, tecnología, precios del tungsteno y tendencias del mercado relacionados con el tungsteno, el molibdeno y las tierras raras, compartiéndolos libremente con la industria del tungsteno. El Dr. Han, con más de 30 años de experiencia desde la década de 1990 en el comercio electrónico y el comercio internacional de productos de tungsteno y molibdeno, así como en el diseño y la fabricación de carburos cementados y aleaciones de alta densidad, es un reconocido experto en productos de tungsteno y molibdeno tanto a nivel nacional como internacional. Fiel al principio de proporcionar información profesional y de alta calidad a la industria, el equipo de CTIA GROUP escribe continuamente documentos de investigación técnica, artículos e informes de la industria basados en las prácticas de producción y las necesidades de los clientes del mercado, obteniendo amplios elogios en la industria. Estos logros brindan un sólido respaldo a la innovación tecnológica, la promoción de productos y los intercambios industriales de CTIA GROUP, impulsándolo a convertirse en un líder en la fabricación de productos de tungsteno y molibdeno y en servicios de información a nivel mundial.



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Tabla de contenido

### Capítulo 1 Descripción general de las barras de remaches de aleación de tungsteno

- 1.1 Definición de barras de remache de aleación de tungsteno
  - 1.1.1 Características estructurales de las barras de remache de aleación de tungsteno
  - 1.1.2 Características básicas de las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 1.1.3 Posicionamiento de barras de remaches de aleación de tungsteno en la ciencia de los materiales
- 1.2 Análisis de los elementos principales en las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 1.2.1 Función del tungsteno en las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 1.2.2 Integración de elementos metálicos auxiliares en barras de remaches de aleación de tungsteno
    - 1.2.2.1 Efecto de la adición de níquel en las barras de remaches de aleación de tungsteno
    - 1.2.2.2 Efecto de la adición de hierro en las barras de remaches de aleación de tungsteno
    - 1.2.2.3 Mecanismo de dopaje de cobre en barras de remaches de aleación de tungsteno
    - 1.2.2.4 Mecanismo de dopaje con otros elementos en barras de remaches de aleación de tungsteno
- 1.3 Microestructura de las barras de remache de aleación de tungsteno
  - 1.3.1 Influencia de la estructura cristalina en el rendimiento de las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 1.3.2 Observación del fenómeno de separación de fases en barras de remaches de aleación de tungsteno
- 1.4 Fundamento teórico de las barras de remache de aleación de tungsteno
  - 1.4.1 Aplicación de diagramas de fases de aleación en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 1.4.2 Influencia de los principios termodinámicos en las barras de remaches de aleación de tungsteno

### Capítulo 2 Clasificación y análisis relacionado de las barras de remache de aleación de tungsteno

- 2.1 Clasificación de las barras de remache de aleación de tungsteno según su composición
  - 2.1.1 Barras de remache de aleación de tungsteno de alta densidad
  - 2.1.2 Barras de remache de aleación de tungsteno de baja densidad
  - 2.1.3 Barras de remache de aleación de tungsteno dopadas con elementos de tierras raras
- 2.2 Clasificación de las barras de remache de aleación de tungsteno según la aplicación
  - 2.2.1 Barras de remache de aleación de tungsteno para el campo del procesamiento mecánico
  - 2.2.2 Barras de remaches de aleación de tungsteno para el campo de instrumentos de precisión
  - 2.2.3 Barras de remache de aleación de tungsteno para entornos de alta temperatura
  - 2.2.4 Barras de remaches de aleación de tungsteno para entornos de desgaste
- 2.3 Análisis de la diferencia de rendimiento de los tipos de barras de remache de aleación de tungsteno
  - 2.3.1 Influencia de los cambios de composición en las propiedades físicas de las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 2.3.2 Implementación del diseño orientado a la aplicación en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 2.3.3 Regulación de las diferencias de microestructura en las propiedades mecánicas de las barras de remaches de aleación de tungsteno

### Capítulo 3 Proceso de preparación de barras de remaches de aleación de tungsteno

- 3.1 Método de pulvimetalurgia para barras de remaches de aleación de tungsteno

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.1.1 Pasos de preparación de la materia prima en la preparación de barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 3.1.1.1 Purificación y control del tamaño de partículas del polvo de tungsteno
  - 3.1.1.2 Uniformidad de la mezcla de elementos de aleación
- 3.1.2 Influencia del proceso de sinterización en la densidad de las barras de remaches de aleación de tungsteno
- 3.1.3 Optimización de la tecnología de conformado por prensado en barras de remaches de aleación de tungsteno
- 3.1.4 Función de la sinterización en fase líquida en la densificación de barras de remaches de aleación de tungsteno
- 3.2 Tecnología de procesamiento mecánico para barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 3.2.1 Aplicación de la conformación en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 3.2.2 Aplicación de la deformación plástica en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 3.2.3 Optimización de la microestructura mediante tratamiento térmico en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 3.2.4 Aplicación del proceso de rectificado de precisión en el procesamiento de superficies de barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 3.2.5 Aplicación del mecanizado por descarga eléctrica para lograr formas complejas de barras de remaches de aleación de tungsteno
- 3.3 Caracterización y control de calidad de barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 3.3.1 Uso del análisis microscópico en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 3.3.2 Identificación de la composición mediante métodos de espectroscopia en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 3.3.3 Importancia de las pruebas de densidad en la evaluación de la calidad de las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 3.3.4 Detección de defectos internos mediante tecnología de pruebas no destructivas en barras de remaches de aleación de tungsteno
- 3.4 Métodos innovadores en el proceso de preparación de barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 3.4.1 Potencial del moldeo por inyección en la producción de barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 3.4.2 Influencia de la tecnología de fabricación aditiva en la personalización de barras de remaches de aleación de tungsteno

## **Capítulo 4 Propiedades físicas de las barras de remache de aleación de tungsteno**

- 4.1 Densidad y propiedades térmicas de las barras de remache de aleación de tungsteno
  - 4.1.1 Principio de medición de densidad en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 4.1.2 Contribución del coeficiente de expansión térmica a la estabilidad de las barras de remaches de aleación de tungsteno
    - 4.1.2.1 Comportamiento térmico de las barras de remache de aleación de tungsteno en condiciones de alta temperatura
    - 4.1.2.2 Respuesta de las barras de remache de aleación de tungsteno en entornos de baja temperatura
  - 4.1.3 Aplicación de la calorimetría diferencial de barrido en barras de remaches de aleación de tungsteno

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

- 4.1.4 Cuantificación de la medición de la conductividad térmica para barras de remaches de aleación de tungsteno
- 4.1.5 Función de la capacidad calorífica específica en la gestión térmica de las barras de remaches de aleación de tungsteno
- 4.2 Propiedades eléctricas y magnéticas de las barras de remache de aleación de tungsteno
  - 4.2.1 Rendimiento de la conductividad eléctrica en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 4.2.2 Implicaciones de los parámetros magnéticos para aplicaciones de barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 4.2.3 Influencia del coeficiente de temperatura de resistencia en la estabilidad eléctrica de las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 4.2.4 Observación del análisis del bucle de histéresis en barras de remaches de aleación de tungsteno
- 4.3 Propiedades ópticas y de radiación de las barras de remache de aleación de tungsteno
  - 4.3.1 Relevancia del análisis de reflectividad en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 4.3.2 Evaluación de la tolerancia a la radiación para barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 4.3.3 Caracterización del espectro de absorción en el rendimiento óptico de barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 4.3.4 Contribución de la sección transversal de absorción de neutrones al blindaje contra la radiación de las barras de remaches de aleación de tungsteno
- 4.4 Hoja de datos de seguridad de CTIA GROUP LTD Barras de remaches de aleación de tungsteno

## Capítulo 5 Propiedades mecánicas de las barras de remache de aleación de tungsteno

- 5.1 Resistencia y dureza de las barras de remache de aleación de tungsteno
  - 5.1.1 Métodos de prueba de resistencia a la tracción en barras de remaches de aleación de tungsteno
    - 5.1.1.1 Mecanismo de fractura de barras de remache de aleación de tungsteno bajo carga estática
    - 5.1.1.2 Influencia de la carga dinámica en las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 5.1.2 Cuantificación de la dureza Vickers en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 5.1.3 Evaluación mediante experimentos de tracción en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 5.1.4 Evaluación mediante pruebas de compresión en barras de remaches de aleación de tungsteno
    - 5.1.4.1 Investigación sobre la influencia de la velocidad de deformación en las barras de remaches de aleación de tungsteno
    - 5.1.4.2 Perspectivas del análisis de fracturas en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 5.1.5 Verificación suplementaria de la resistencia a la flexión en las propiedades mecánicas de las barras de remaches de aleación de tungsteno
- 5.2 Tenacidad y comportamiento a la fatiga de las barras de remache de aleación de tungsteno
  - 5.2.1 Función de la tenacidad al impacto en la durabilidad de las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 5.2.2 Aplicación del análisis de fatiga cíclica en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 5.2.3 Métodos de medición de la tenacidad a la fractura en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 5.2.4 Predicción de la fatiga de alto ciclo en la vida útil de las barras de remaches de aleación de tungsteno
- 5.3 Características de fricción y desgaste de las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 5.3.1 Optimización mediante la medición del coeficiente de fricción para barras de remaches de aleación de tungsteno

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.3.2 Análisis de los mecanismos de desgaste en las barras de remaches de aleación de tungsteno
- 5.3.3 Análisis del desgaste abrasivo en daños superficiales de barras de remaches de aleación de tungsteno
- 5.3.4 Rendimiento del desgaste adhesivo en el proceso de contacto de barras de remaches de aleación de tungsteno

## **Capítulo 6 Corrosión y durabilidad de las barras de remaches de aleación de tungsteno**

- 6.1 Comportamiento de corrosión electroquímica de barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 6.1.1 Uso de curvas de polarización en la investigación de la corrosión de barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 6.1.2 Protección mediante la formación de una capa pasiva en barras de remaches de aleación de tungsteno
    - 6.1.2.1 Estabilidad de las barras de remaches de aleación de tungsteno en entornos ácidos
    - 6.1.2.2 Respuesta de las barras de remache de aleación de tungsteno en condiciones alcalinas
  - 6.1.3 Caracterización mediante medición del potencial de corrosión para barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 6.1.4 Aplicación de la espectroscopia de impedancia en la cinética de corrosión de barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 6.1.5 Reacciones de oxidación en el comportamiento de corrosión de las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 6.1.6 Regulación de los factores ambientales sobre las propiedades químicas de las barras de remaches de aleación de tungsteno
- 6.2 Mecanismo de oxidación a alta temperatura de las barras de remache de aleación de tungsteno
  - 6.2.1 Influencia de la cinética de oxidación en las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 6.2.2 Aplicación de recubrimientos protectores en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 6.2.3 Destrucción por formación de óxido volátil en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 6.2.4 Regulación de los elementos de aleación sobre la resistencia a la oxidación de las barras de remaches de aleación de tungsteno
- 6.3 Prueba de durabilidad ambiental de barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 6.3.1 Evaluación mediante prueba de niebla salina en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 6.3.2 Función de los ciclos de humedad en la durabilidad de las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 6.3.3 Integración de simulación multiescala en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 6.3.4 Prueba de sensibilidad del agrietamiento por corrosión bajo tensión en barras de remaches de aleación de tungsteno

## **Capítulo 7 Aplicaciones de las barras de remache de aleación de tungsteno**

- 7.1 Aplicaciones de las barras de remache de aleación de tungsteno en procesos de remachado
  - 7.1.1 Función mecánica de las barras de remaches de aleación de tungsteno en el proceso de formación de remaches
  - 7.1.2 Mecanismo de interacción entre la barra de refuerzo y el material del remache

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

- 7.1.2.1 Análisis de la distribución de la tensión de contacto en aplicaciones de barras de remaches de aleación de tungsteno
- 7.1.2.2 Influencia de la coordinación de la deformación en la durabilidad de las barras de remaches de aleación de tungsteno
- 7.1.3 Requisitos del remachado de alta resistencia en el rendimiento de las barras de remaches de aleación de tungsteno
- 7.1.4 Adaptabilidad de las barras de remaches de aleación de tungsteno en equipos de remachado automatizados
- 7.2 Aplicaciones de las barras de remache de aleación de tungsteno en conexiones estructurales aeroespaciales
  - 7.2.1 Principios de selección de barras de remaches de aleación de tungsteno en el remachado de aleación de titanio
  - 7.2.2 Demanda de características superficiales de barras de remaches de aleación de tungsteno en el remachado de materiales compuestos
  - 7.2.3 Análisis de estabilidad de barras de remaches de aleación de tungsteno en entornos de vibración
  - 7.2.4 Requisitos especiales de los procesos de remachado a baja temperatura en barras de remaches de aleación de tungsteno
- 7.3 Aplicaciones de las barras de remache de aleación de tungsteno en la fabricación de sistemas de transporte ferroviario y automotriz
  - 7.3.1 Adaptabilidad de las barras de remache de aleación de tungsteno en el remachado de carrocerías ligeras
  - 7.3.2 Examen del comportamiento de desgaste de las barras de remaches de aleación de tungsteno en procesos de remachado de alta frecuencia
  - 7.3.3 Compatibilidad de las barras de remache de aleación de tungsteno en conexiones multimateriales
- 7.4 Aplicaciones de las barras de remache de aleación de tungsteno en el ensamblaje mecánico de precisión
  - 7.4.1 Requisitos del microrremachado para la precisión dimensional de las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 7.4.2 Función de la modificación de la superficie en aplicaciones de precisión de barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 7.4.3 Demanda de pureza del material de las barras de remaches de aleación de tungsteno en entornos de sala limpia

## Capítulo 8 Problemas comunes de las barras de remaches de aleación de tungsteno

- 8.1 Formación de defectos en el proceso de preparación de barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 8.1.1 Influencia de la sinterización desigual en la microestructura de las barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 8.1.2 Fuentes y control de la contaminación por impurezas en barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 8.1.3 Mecanismo de inicio de grietas en la etapa de prensado de barras de remaches de aleación de tungsteno
  - 8.1.4 Análisis de causa de porosidad residual en barras de remaches de aleación de tungsteno

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 8.2 Modos de falla en el uso de barras de remache de aleación de tungsteno

8.2.1 Mecanismo de fractura causado por sobrecarga mecánica en barras de remaches de aleación de tungsteno

8.2.2 Efecto acumulativo del desgaste y la fatiga en barras de remaches de aleación de tungsteno

8.2.3 Reducción de la vida útil por entornos corrosivos en barras de remaches de aleación de tungsteno

8.2.4 Fenómeno de agrietamiento causado por choque térmico en barras de remaches de aleación de tungsteno

8.2.5 Influencia del desconchado superficial en la función de las barras de remaches de aleación de tungsteno

## 8.3 Optimización del rendimiento y diagnóstico de fallas en barras de remaches de aleación de tungsteno

8.3.1 Mitigación de problemas comunes mediante el ajuste de la composición en barras de remaches de aleación de tungsteno

8.3.2 Aplicación de métodos de pruebas no destructivas en la identificación de defectos en barras de remaches de aleación de tungsteno

8.3.3 Mejora de la durabilidad mediante el proceso de tratamiento térmico en barras de remaches de aleación de tungsteno

8.3.4 Mejora de la resistencia al desgaste mediante tecnología de refuerzo de superficies en barras de remaches de aleación de tungsteno

8.3.5 Función del análisis de casos de falla en la optimización de barras de remaches de aleación de tungsteno

8.4 Comparación del rendimiento de las barras de refuerzo con remaches de aleación de tungsteno con otros materiales de barras de refuerzo

8.4.1 Comparación del rendimiento entre las barras de refuerzo de carburo cementado y las barras de refuerzo con remaches de aleación de tungsteno

8.4.2 Comparación del rendimiento de las barras de refuerzo de acero que sustituyen a las barras de refuerzo con remaches de aleación de tungsteno

8.4.3 Comparación del rendimiento de las barras de refuerzo de material cerámico con las barras de refuerzo de remaches de aleación de tungsteno

## Apéndices:

Apéndice A Normas chinas para barras de remaches de aleación de tungsteno

Apéndice B Normas internacionales para barras de remaches de aleación de tungsteno

Apéndice C Normas para barras de remaches de aleación de tungsteno en Europa, América, Japón, Corea, etc.

Apéndice D Glosario de términos de barras de remaches de aleación de tungsteno

Referencias



CTIA GROUP LTD Varilla superior con remache de aleación de tungsteno

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## CTIA GROUP LTD

### 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/cm<sup>3</sup>), 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

## Capítulo 1 Descripción general de las tapas de remaches de aleación de tungsteno

### 1.1 Definición de varilla superior con remache de aleación de tungsteno

Los mandriles para remaches de aleación de tungsteno son productos de aleación cuyo componente principal es el tungsteno. Se fabrican típicamente mediante pulvimetalurgia y se mecanizan en herramientas específicas con forma de varilla, utilizadas principalmente para soporte y conformación durante el proceso de remachado. Estos mandriles se colocan en la cola del remache durante la instalación, actuando como soporte inverso para resistir el martilleo o la presión, permitiendo que la cabeza del remache se deforme suavemente y forme una conexión segura. La aleación de tungsteno se elige por su alta densidad y dureza, lo que le permite mantener la estabilidad de la forma bajo impactos repetidos, a la vez que posee cierta tenacidad para prevenir la fractura por fragilidad. El diámetro y la longitud del mandril se diseñan según las especificaciones del remache, y su superficie suele rectificarse con precisión para asegurar un buen ajuste con la cola del remache.

Los mandriles de aleación de tungsteno suelen utilizar aleaciones de tungsteno-níquel-hierro o tungsteno-níquel-cobre. La fase aglutinante proporciona la plasticidad necesaria, lo que reduce la propensión al agrietamiento del mandril durante el procesamiento y el uso. El proceso de preparación incluye la mezcla de polvos, el prensado, la sinterización y el procesamiento termomecánico, con un tratamiento térmico final para ajustar la microestructura. La superficie de trabajo del mandril debe ser lisa y plana para reducir la fricción y los daños durante la deformación del remache. La aparición de los mandriles de aleación de tungsteno ha solucionado el problema de la insuficiente durabilidad de los mandriles de acero tradicionales en aplicaciones de remaches de alta resistencia, especialmente en aplicaciones que requieren múltiples usos, donde su vida útil es más estable.

Desde una perspectiva funcional, los remachadores de aleación de tungsteno no solo proporcionan soporte mecánico, sino que también, gracias a su alta densidad, ayudan a concentrar la transmisión de energía, lo que resulta en una deformación más uniforme del remache. La forma de la cara del remachador es diversa, como plana, cóncava o convexa, para adaptarse a diferentes tipos de remaches. En uso, el remachador se fija a una remachadora neumática o manual, y el operador controla la fuerza para lograr la conexión. El mantenimiento de los remachadores de aleación de tungsteno es relativamente sencillo; basta con la inspección regular del desgaste de la superficie y el pulido. En conclusión, como un componente importante de las herramientas de remachado, los remachadores de aleación de tungsteno, con sus ventajas materiales, mejoran la eficiencia y la calidad del proceso de conexión y están ganando gradualmente reconocimiento en el campo del ensamblaje industrial.

#### 1.1.1 Características estructurales de las barras superiores de remaches de aleación de tungsteno

Los mandriles para remaches de aleación de tungsteno se caracterizan principalmente por su forma de varilla y su microestructura interna bifásica. El diseño externo enfatiza la adaptabilidad funcional, mientras que la microestructura interna determina su durabilidad. El mandril tiene forma cilíndrica, con un extremo que sirve como superficie de trabajo para el contacto directo con la cola del remache y el

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



otro como extremo de agarre o fijación para facilitar su instalación en la remachadora. La superficie de trabajo suele ser plana o con ranuras poco profundas para absorber mejor la deformación de la cola del remache, y sus lados lisos reducen la resistencia de operación. La relación entre longitud y diámetro se adapta al tamaño del remache para garantizar un soporte estable sin interferir con los componentes circundantes.

La estructura interna presenta las características típicas de la aleación de tungsteno de doble fase: las partículas de tungsteno forman un esqueleto continuo como fase dura, y las fases aglutinantes, como níquel-hierro o níquel-cobre, rellenan los huecos, lo que proporciona conectividad y tenacidad. Esta microestructura se forma mediante un proceso de sinterización, con partículas de tungsteno casi esféricas y una fase aglutinante uniformemente distribuida para evitar la concentración de tensiones. Tras el trabajo en caliente, la microestructura presenta una textura fibrosa, alineada axialmente para mejorar la resistencia longitudinal. La superficie está finamente rectificada, lo que resulta en una baja rugosidad y una menor adherencia de los remaches.

Las características estructurales también incluyen el diseño de la cara final; las barras superiores cóncavas ayudan al remache a formar una cabeza de hongo, y las superficies planas proporcionan un soporte temporal para remaches de gran superficie. El extremo fijo suele tener roscas o ranuras para una conexión rápida a la remachadora. Las barras superiores de aleación de tungsteno son compactas, moderadamente pesadas y fáciles de operar, ya sea manual o automáticamente. Tras el tratamiento térmico, se libera la tensión interna y la estructura se estabiliza para resistir la fatiga por impacto.

Desde una perspectiva de uso, esta característica estructural optimiza la transferencia de energía en el mandril y el control de la zona de deformación durante el remachado. El diseño estructural del mandril de aleación de tungsteno refleja consideraciones prácticas en la ingeniería de herramientas, optimizando su función de soporte mediante la coordinación de su forma y estructura, y desempeñando un papel estabilizador en las líneas de montaje y las tareas de mantenimiento. Con el desarrollo de la tecnología de remachado, la estructura del mandril también se está perfeccionando gradualmente para adaptarse a las necesidades de conexión.

### 1.1.2 Características básicas de las barras superiores de remaches de aleación de tungsteno

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno se caracterizan principalmente por la combinación de sus propiedades materiales y su diseño funcional. Esta herramienta actúa como soporte durante el remachado, debiendo soportar impactos y presiones repetidos, manteniendo la estabilidad de su forma. La alta densidad de la aleación de tungsteno es una de sus características más significativas. Esta propiedad permite que el mandril tenga mayor masa para el mismo volumen, proporcionando un mayor soporte inercial y ayudando a concentrar la transferencia de energía durante la deformación de la cola del remache, lo que resulta en una conexión más uniforme. Su alta dureza es otra característica importante. La fase de tungsteno actúa como un esqueleto duro para resistir el desgaste, mientras que la fase aglutinante proporciona cierta tenacidad, evitando el astillado o las abolladuras durante el uso frecuente. La resistencia al calor también es excepcional. La aleación de tungsteno tiene baja tendencia a ablandarse

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bajo las altas temperaturas localizadas generadas durante el remachado, y el material del remache no se adhiere fácilmente a la superficie, manteniéndola lisa.

La maquinabilidad de los mandriles de aleación de tungsteno permite un conformado preciso; el diámetro del mandril y la forma de la cara final se pueden personalizar según el tipo de remache. El bajo coeficiente de fricción tras el pulido de la superficie reduce la resistencia durante la deformación del remache. Su estabilidad química hace que el mandril sea resistente a la corrosión por aceite o refrigerante en el taller y no es propenso a oxidarse durante el almacenamiento prolongado. Su peso moderado facilita su sujeción por parte de los operarios o la instalación del equipo sin añadir carga excesiva. Estas características de los mandriles de aleación de tungsteno se deben a la estructura de doble fase formada por pulvimetalurgia, donde las partículas de tungsteno se distribuyen uniformemente y una fase aglutinante rellena los huecos, lo que resulta en propiedades mecánicas equilibradas.

En la práctica, estas características se manifiestan en una larga vida útil, lo que permite que un mismo mandril admita múltiples operaciones de remachado sin necesidad de reemplazos frecuentes, y la posibilidad de restaurar una superficie de trabajo desgastada mediante un simple pulido. Los mandriles de aleación de tungsteno también ofrecen una excelente respuesta acústica, produciendo un sonido nítido al impacto, lo que facilita a los operadores evaluar la calidad del remachado. Presentan diversos diseños de cara final; los diseños de cabeza plana son adecuados para remaches estándar, mientras que los diseños de cabeza cóncava ayudan a crear formas de cabeza específicas. Estas características fundamentales hacen que los mandriles de aleación de tungsteno sean excelentes para líneas de montaje y trabajos de mantenimiento, convirtiéndose gradualmente en una herramienta de uso común para el remachado de alta resistencia. Con los avances en el procesamiento de materiales, estas características se perfeccionan continuamente para adaptarse a las necesidades de conexión más diversas.

### 1.1.3 La posición de las puntas de remache de aleación de tungsteno en la ciencia de los materiales

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno se clasifican como materiales para herramientas de aleación refractaria de alta densidad. Este posicionamiento se debe a la aplicación de aleaciones de tungsteno en el diseño de compuestos de fases duras y tenaces, lo que compensa la falta de durabilidad al alto impacto de los aceros para herramientas tradicionales. En la ciencia de los materiales, las aleaciones de tungsteno se consideran representativas de los materiales compuestos de pulvimetalurgia, donde las partículas de tungsteno se unen a la fase aglutinante mediante sinterización en fase líquida o procesos de infiltración de material fundido, formando estructuras de pseudoaleación o aleación verdadera. Los mandriles de remache, como producto específico de este material, representan la aplicación de la ingeniería de los metales refractarios al campo de las herramientas funcionales.

espectro de materiales de herramientas de impacto . En comparación con el carburo de tungsteno cementado, las aleaciones de tungsteno enfatizan un mejor equilibrio de tenacidad, mientras que en comparación con el acero de alta velocidad, priorizan la densidad y la resistencia al calor. En la investigación de la ciencia de los materiales, estos mandriles se utilizan a menudo como estudios de caso para analizar el comportamiento mecánico de las microestructuras de fase dual, donde las partículas de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno proporcionan soporte de dureza y la fase aglutinante coordina la deformación y absorbe energía. Posicionados como un material de herramienta de ensamblaje de precisión, los mandriles de aleación de tungsteno respaldan el desarrollo de remachado de alta resistencia, especialmente en aplicaciones que requieren un uso repetido. En una clasificación más amplia de materiales, los mandriles de aleación de tungsteno se incluyen en la categoría de materiales estructurales funcionales, que proporcionan tanto soporte mecánico como optimizan la transferencia de energía a través de las características de densidad. Los avances en la ciencia de los materiales han llevado a la evolución de estos mandriles desde los reemplazos de acero tradicionales hasta las optimizaciones de compuestos, con tratamientos de superficie o microaleación que mejoran aún más su rendimiento. El papel de los mandriles de aleación de tungsteno refleja la transformación de las aleaciones refractarias, desde la investigación básica hasta las aplicaciones en herramientas, proporcionando un soporte fiable en la ingeniería de ensamblaje. Con los avances en las tecnologías de unión, el papel de este material también se está expandiendo, incorporando elementos más inteligentes o respetuosos con el medio ambiente.

## 1.2 Análisis elemental principal de barras superiores de remaches de aleación de tungsteno

Los mandriles para remaches de aleación de tungsteno se centran en el efecto sinérgico del tungsteno como componente principal con otros metales auxiliares. Este análisis ayuda a comprender el origen del rendimiento del material en el refuerzo contra impactos. El tungsteno proporciona la base para una alta densidad y dureza, mientras que elementos auxiliares como el níquel, el hierro o el cobre mejoran el equilibrio entre trabajabilidad y tenacidad. Las proporciones elementales se diseñan según diagramas de fases y el comportamiento de sinterización, con un mayor contenido de tungsteno para mantener la densidad y la adición adecuada de elementos auxiliares para promover una microestructura uniforme.

Los mandriles de aleación de tungsteno consideran requisitos funcionales: alta densidad para soportar la transmisión de energía de impacto, dureza para resistir el desgaste y tenacidad para prevenir la fractura frágil. Las propiedades refractarias del tungsteno se manifiestan en la estabilidad a altas temperaturas en el mandril, mientras que los elementos auxiliares reducen la temperatura de transición frágil, permitiendo que el material se procese a temperatura ambiente. La integración de los elementos se logra mediante pulvimetalurgia, con una mezcla homogénea seguida de sinterización para formar una estructura bifásica. El análisis también se extiende al control de impurezas; el oxígeno o el carbono residuales pueden inducir defectos, lo que requiere un control de purificación. El análisis elemental de los mandriles de aleación de tungsteno proporciona una base para la optimización del proceso, lo que contribuye al rendimiento estable de la herramienta en conjuntos de remachado. Con los avances en la investigación de materiales, el análisis elemental se está refinando cada vez más para adaptarse a más escenarios de unión.

### 1.2.1 El papel del tungsteno en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno

La función principal del tungsteno en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno es proporcionar un soporte de alta densidad y dureza. Esto garantiza que el mandril mantenga su estabilidad dimensional y transmita eficazmente la energía bajo los impactos del remachado. Como elemento principal, el tungsteno posee una gran masa atómica y una estructura cristalina compacta, formando una estructura

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de fase dura en el mandril que resiste el desgaste y las abolladuras en la superficie de trabajo. Durante el remachado, el mandril soporta martillazos repetidos; la alta dureza del tungsteno reduce la deformación de la superficie, mantiene un contacto preciso con la cola del remache y ayuda a que la cabeza del remache se forme uniformemente. La resistencia térmica del tungsteno también influye en el uso de los mandriles. Durante el calentamiento por fricción localizado, la fase de tungsteno tiene baja tendencia a ablandarse, lo que resulta en cambios dimensionales generales mínimos en el mandril y previene daños por fatiga térmica. La alta densidad del tungsteno concentra la masa del mandril, lo que genera mayor inercia para el mismo volumen, una transferencia más eficiente de la energía de impacto al remache y una resistencia de conexión más estable. Durante el proceso de sinterización, la distribución esférica de las partículas de tungsteno reduce la energía superficial, lo que promueve la densificación, dando como resultado menos poros internos y una resistencia constante dentro del mandril.

La función del tungsteno también se refleja en su estabilidad química. Cuando el mandril se expone al ambiente del taller, la fase de tungsteno presenta una fuerte resistencia a la oxidación, lo que evita la formación de una capa porosa en su superficie y mantiene un acabado liso. Incluso tras la adición de elementos auxiliares, la fase de tungsteno sigue dominando el rendimiento, lo que resulta en un desgaste lento del mandril durante el uso prolongado. El papel del tungsteno en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno demuestra la contribución fundamental de los metales refractarios a los materiales de las herramientas, lo que facilita procesos de remachado fiables gracias a su densidad y dureza, y adquiere un valor práctico en el sector del ensamblaje.

### **1.2.2 Integración de elementos metálicos auxiliares en varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno**

La integración de elementos metálicos auxiliares en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se logra principalmente mediante una fase aglutinante. Estos elementos, como el níquel, el hierro o el cobre, se combinan con partículas de tungsteno para formar una estructura bifásica, lo que mejora la tenacidad general y la adaptabilidad al procesamiento. El proceso de integración se completa durante las etapas de mezcla y sinterización del polvo. El polvo del elemento auxiliar se distribuye uniformemente entre las partículas de tungsteno, fundiéndolas y humedeciéndolas durante la sinterización en fase líquida, relleno los huecos y estableciendo las conexiones. Químicamente, los elementos auxiliares presentan baja miscibilidad con el tungsteno, manteniendo límites de fase claros, mientras que la fase aglutinante proporciona coordinación de la deformación y reduce la fragilidad del mandril.

La función de la integración es equilibrar la alta dureza del tungsteno, y los elementos auxiliares reducen la temperatura de transición frágil a temperatura ambiente, lo que permite que el mandril absorba energía bajo cargas de impacto y evite fracturas repentinas. El níquel se utiliza comúnmente como elemento auxiliar principal; su alta ductilidad mejora el rendimiento del mandril en trabajo en frío tras la integración, facilitando el rectificado de precisión de la cara final. La adición de hierro o cobre ajusta aún más la densidad o la conductividad térmica, y la relación de integración se ajusta según las especificaciones del mandril. El tratamiento térmico posterior a la sinterización promueve la difusión de los elementos, mejora la resistencia de la unión interfacial y aumenta la resistencia a la fatiga del mandril.

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



La integración de elementos auxiliares también afecta las propiedades superficiales; la fase aglutinante expuesta mejora la resistencia a la corrosión y el mandril es más estable en ambientes húmedos. La uniformidad de la integración se controla mediante molienda de bolas de polvo o secado por aspersión para evitar fluctuaciones en el rendimiento causadas por aglomeración localizada. La integración de elementos metálicos auxiliares en mandriles de aleación de tungsteno materializa el diseño sinérgico de los materiales compuestos, optimizando el rendimiento general de la herramienta gracias al efecto puente de la fase aglutinante y proporcionando una base fiable para los soportes de remachado.

#### 1.2.2.1 Efecto de la adición de níquel en las varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno

La adición de níquel a los mandriles de remaches de aleación de tungsteno mejora principalmente la tenacidad y la maquinabilidad. Este efecto permite que el mandril absorba más energía en condiciones de impacto, reduciendo el riesgo de fractura frágil. Como elemento aglutinante clave, el níquel forma una solución sólida cúbica centrada en las caras durante la sinterización, encapsulando las partículas de tungsteno y proporcionando canales de deformación continuos. Químicamente, el níquel presenta una buena humectabilidad al tungsteno, lo que resulta en un flujo uniforme en la fase líquida, promoviendo la reorganización y densificación de las partículas y dando lugar a una estructura interna más densa en el mandril. Con la adición de níquel, la plasticidad a temperatura ambiente de la barra expulsora mejora, reduciéndola su propensión a agrietarse durante el trabajo en frío, como el rectificado o el torneado, y facilitando la obtención del acabado superficial requerido. En aplicaciones de impacto, el níquel ayuda a equilibrar la distribución de la tensión de las partículas de tungsteno, reduciendo la tendencia de la superficie de trabajo de la barra expulsora a abollarse o astillarse, lo que resulta en una vida útil más estable. La resistencia a la corrosión del níquel también se transfiere a la superficie de la barra expulsora, resistiendo el aceite y la humedad en el taller y manteniendo la limpieza.

La proporción de níquel añadido afecta el equilibrio de efectos: una cantidad adecuada mejora significativamente la tenacidad, mientras que cantidades excesivas reducen ligeramente la densidad. Tras el tratamiento térmico, la fase de níquel se vuelve más homogénea, se mejora la unión interfacial y se mejora la resistencia a la fatiga del mandril. El efecto de la adición de níquel en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno refleja el efecto de endurecimiento de un elemento aglutinante, lo que aumenta la durabilidad de la herramienta durante el remachado mediante la coordinación de la interfase y aporta valor práctico en aplicaciones de montaje.

#### 1.2.2.2 Efecto de la adición de hierro en las varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno

La adición de hierro a los mandriles de remaches de aleación de tungsteno forma principalmente un sistema de fase aglutinante con níquel, creando una solución sólida de níquel-hierro. Esta adición afecta significativamente las propiedades mecánicas y las características de procesamiento del mandril. El hierro es infinitamente miscible con el níquel, lo que reduce la temperatura de aparición de líquido durante la sinterización, promueve la reorganización y densificación de las partículas de tungsteno y, simultáneamente, ajusta la energía de falla de apilamiento de la fase aglutinante, haciéndolo más propenso al deslizamiento cruzado y la deformación por maclado. La adición de hierro potencia el efecto

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de fijación de la fase aglutinante sobre las dislocaciones, mejorando el límite elástico general y la resistencia a la fatiga del mandril. En el entorno de remachado por impacto repetido, la superficie de trabajo del mandril es menos propensa a microfisuras o abolladuras.

La adición de hierro mejora las propiedades magnéticas del mandril, una característica que puede utilizarse para la sujeción o el posicionamiento magnético en ciertas aplicaciones de ensamblaje, facilitando así la operación automatizada. El hierro también mejora la resistencia a la oxidación de la fase aglutinante, formando una capa protectora más densa en la superficie, lo que reduce la propensión del mandril a la corrosión localizada en ambientes húmedos o aceitosos. Ajustar la relación hierro-níquel influye en la intensidad del efecto; un contenido moderado de hierro proporciona un buen equilibrio entre tenacidad y resistencia, reduciendo la probabilidad de astillado de los bordes durante procesos de trabajo en frío como el torneado o el rectificado. Durante el tratamiento térmico, el hierro promueve la distribución uniforme de las fases precipitadas, reforzando aún más la microestructura. La adición de hierro también contribuye a la estabilidad térmica del mandril; durante el recocido a alta temperatura, el hierro inhibe el engrosamiento excesivo de la fase aglutinante, manteniendo una estructura de grano fino, lo que resulta en cambios dimensionales mínimos durante el calentamiento por fricción localizado. La eficiencia económica del hierro convierte al sistema tungsteno-níquel-hierro en una opción común, con materias primas fácilmente disponibles y costos de producción relativamente controlables. El efecto de la adición de hierro también se refleja en la respuesta acústica; el sonido al impactar es más atenuado, lo que ayuda a los operadores a evaluar la fuerza del remachado. La adición de hierro a los mandriles de remaches de aleación de tungsteno demuestra el efecto reforzante de los elementos auxiliares en la fase aglutinante. Gracias a la sinergia con el níquel, optimiza el rendimiento general del mandril y aporta valor práctico en el campo de las herramientas de remachado.

### 1.2.2.3 Mecanismo de dopaje de cobre en mandriles de remaches de aleación de tungsteno

El mecanismo de dopaje con cobre en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se manifiesta principalmente en la formación de una fase aglutinante no magnética y la mejora de la conductividad térmica. Este mecanismo es adecuado para aplicaciones de remachado que requieren evitar la interferencia magnética o la rápida disipación del calor. El cobre y el níquel son infinitamente miscibles, formando una solución sólida cúbica centrada en las caras en el sistema tungsteno-níquel-cobre. Durante la sinterización, la fase líquida fluye y humedece las partículas de tungsteno, promoviendo su reorganización y densificación. Al mismo tiempo, la alta conductividad térmica del cobre hace que el gradiente de temperatura del mandril sea más gradual durante el calentamiento por impacto, reduciendo así la concentración de tensiones térmicas.

La clave del dopaje con cobre reside en su contribución a la uniformidad de la microestructura. La fase de cobre rellena los huecos en la estructura de tungsteno, formando una red continua. Químicamente, el cobre presenta un ángulo de humectación pequeño con el tungsteno, lo que resulta en una interfaz limpia y una dispersión de energía más uniforme durante las pruebas de impacto. La alta ductilidad del cobre mejora la plasticidad a temperatura ambiente del pasador eyector, optimizando su rendimiento en trabajo en frío y facilitando el moldeo de precisión de caras finales complejas. El dopaje con cobre también

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

introduce un efecto no magnético, evitando interferencias cuando el pasador eyector se utiliza cerca de equipos de sujeción magnéticos, lo que lo hace adecuado para líneas de montaje electrónicas.

El cobre también modula el comportamiento de expansión térmica en el mecanismo, reduce la tensión interna al coincidir con el tungsteno y minimiza la tendencia al agrietamiento bajo el ciclo térmico del mandril. En términos de propiedades de la superficie, la fase de cobre expuesta mejora la resistencia a la corrosión y el mandril es resistente al aceite y a los agentes de limpieza. La relación de dopaje de cobre afecta el rendimiento del mecanismo; en un nivel apropiado, la conductividad térmica y la tenacidad están equilibradas. Después del tratamiento térmico, la fase de cobre se vuelve más homogénea, mejorando la resistencia a la fatiga del mandril. El mecanismo de dopaje de cobre encarna la integración funcional de la fase conductora en el material compuesto, optimizando el comportamiento termomecánico del mandril a través del relleno de la red y desempeñando un papel estabilizador en los soportes de remache.

#### 1.2.2.4 Mecanismo de dopaje de otros elementos en mandriles de remaches de aleación de tungsteno

El dopaje de otros elementos en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se logra principalmente mediante microaleación o reforzamiento por dispersión. Estos elementos, como el cobalto, el molibdeno o los compuestos de tierras raras, se añaden en pequeñas cantidades para refinar la microestructura o mejorar propiedades específicas. El dopaje con cobalto mejora la resistencia de la fase aglutinante; químicamente, el cobalto reduce la energía de falla de apilamiento y promueve la deformación por maclado, mejorando así la tenacidad al impacto del mandril. El molibdeno reemplaza parcialmente al tungsteno, regulando la expansión térmica y la temperatura de recristalización, lo que resulta en una mejor estabilidad dimensional del mandril a alta temperatura.

Los elementos de tierras raras, como el lantano o el itrio, se dispersan en forma de óxido, fijando los límites de grano para dificultar la migración y aumentar la temperatura de recristalización. Esto da como resultado granos finos en los mandriles después del trabajo en caliente, lo que mejora su resistencia y durabilidad. La adición de pequeñas cantidades de carburos, como el carburo de titanio, forma una tercera fase de refuerzo, lo que aumenta aún más la dureza superficial de los mandriles y resiste el desgaste de los remaches. Mecánicamente, estos elementos se segregan en las interfaces o límites de grano durante la sinterización, alterando la energía superficial y las vías de difusión, lo que resulta en una microestructura más densa y uniforme.

El mecanismo de dopaje también incluye un efecto de purificación, donde los elementos de tierras raras capturan impurezas de oxígeno y azufre para formar compuestos estables y reducir inclusiones frágiles. El dopaje compuesto de cobalto-molibdeno refuerza sinérgicamente el material, lo que resulta en un rendimiento general equilibrado del mandril. Se mantiene un control estricto de la cantidad de dopaje para evitar la introducción excesiva de nuevas fases que podrían dañar la tenacidad. El tratamiento térmico activa el material, y el tratamiento de solución y el envejecimiento precipitan partículas finas. Los mecanismos de dopaje de otros elementos demuestran la optimización del material a través de la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

microaleación; se logran mejoras específicas en el rendimiento de los mandriles de aleación de tungsteno mediante pequeñas adiciones, lo que contribuye a mejoras prácticas en las herramientas de remachado.

### 1.3 Microestructura de la barra superior del remache de aleación de tungsteno

La microestructura de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se caracteriza por una estructura compuesta de dos fases. Las partículas de tungsteno, que actúan como fase dura, están encapsuladas por una fase aglutinante, formando una microestructura similar al cermet. Esta estructura se origina en la pulvimetalurgia y ha evolucionado posteriormente tras la sinterización y el trabajo en caliente. Las partículas de tungsteno son en su mayoría casi esféricas o poliédricas, y su distribución de tamaño afecta al equilibrio entre resistencia y tenacidad. La fase aglutinante rellena los huecos entre partículas, proporcionando canales de deformación continuos. La capa de interfaz es crucial para la estructura; la zona de transición formada por la difusión de elementos mejora la unión. Defectos como la porosidad o la segregación dentro de la estructura deben controlarse para mantener la resistencia al impacto del mandril.

La observación microestructural suele utilizar la microscopía electrónica de barrido (MEB) y la microscopía electrónica de transmisión (MET) para revelar el grado de esferoidización de las partículas y la uniformidad de la distribución de fases. El laminado introduce una textura fibrosa, alineándola axialmente para mejorar la resistencia longitudinal. El tratamiento térmico ajusta el tamaño del grano y las fases precipitadas, optimizando así el rendimiento. La microestructura de los mandriles de aleación de tungsteno encarna la práctica de ingeniería del diseño de compuestos de aleación refractaria, lo que permite un rendimiento estable de la herramienta en el remachado mediante la coordinación de interfases y proporciona un soporte fiable en aplicaciones de ensamblaje.

#### 1.3.1 Influencia de la estructura cristalina en el rendimiento de los remaches de aleación de tungsteno

La influencia de la estructura cristalina en el rendimiento de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se refleja principalmente en la interacción entre la red cúbica centrada en el cuerpo de la fase de tungsteno y la red cúbica centrada en la cara de la fase aglutinante. Esta influencia determina la dureza, tenacidad y resistencia a la fatiga del mandril. Las partículas de tungsteno mantienen una estructura cúbica centrada en el cuerpo, con sistemas de deslizamiento limitado pero alta dureza, proporcionando un soporte rígido bajo cargas de impacto y resistiendo la deformación de la superficie de trabajo. La fase aglutinante, con sus abundantes sistemas de deslizamiento de red cúbica centrada en la cara, exhibe una fuerte capacidad de coordinación de deformación, absorbe la energía del impacto y previene la fractura frágil del mandril. La orientación del cristal forma textura durante el procesamiento, con elongación del grano a lo largo de la dirección de laminación, aumentando la resistencia axial.

La influencia de la estructura cristalina también se refleja en la adaptación de la interfaz. El desajuste reticular entre el tungsteno y la fase aglutinante genera un campo de tensión, que se libera mediante el tratamiento térmico, lo que resulta en una unión más estable. El recocido induce la recrystalización, y el

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



refinamiento del grano mejora el equilibrio entre resistencia y tenacidad. Las impurezas se segregan en los límites de grano, alterando la estabilidad estructural; los procesos de purificación reducen estos efectos. Los defectos cristalinos, como las dislocaciones, se multiplican bajo impacto, y la fase aglutinante se recupera rápidamente, lo que resulta en una mejor resistencia a la fatiga del mandril.

Durante el ciclo térmico, la diferencia en la expansión térmica de la estructura cristalina genera microesfuerzos, pero la fase aglutinante amortigua estos esfuerzos, garantizando la estabilidad dimensional del mandril. Los cristales superficiales expuestos afectan el desgaste; el pulido reduce la fricción al crear una superficie cristalina lisa. La influencia de la estructura cristalina en el rendimiento de los mandriles para remaches de aleación de tungsteno refleja el principio de sinergia fase-red de la ciencia de los materiales. La optimización estructural refuerza la durabilidad de la herramienta, aportando valor práctico al remachado.

### 1.3.2 Observación del fenómeno de separación de fases en varillas con remaches de aleación de tungsteno

La observación de la separación de fases en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se centra principalmente en las características de distribución de la fase de tungsteno y la fase aglutinante. Este fenómeno se origina en el flujo de la fase líquida y la precipitación por enfriamiento durante la sinterización, manifestándose como la esferoidización y separación de partículas de tungsteno y el relleno de la red de la fase aglutinante. La microscopía electrónica de barrido (MEB) en modo de retrodispersión se utiliza comúnmente para la observación; la fase de tungsteno, con su mayor número atómico, aparece más brillante, mientras que la fase aglutinante aparece más oscura, creando un contraste sorprendente. Las partículas de tungsteno están separadas casi esféricamente, con el espaciado determinado por el volumen de la fase aglutinante; esta separación uniforme promueve la dispersión de tensiones.

La observación de la separación de fases también reveló una capa de transición interfacial donde la difusión de elementos forma una región de gradiente, lo que mejora la unión y previene la delaminación. Una sinterización insuficiente resulta en una separación incompleta y poros residuales; una sinterización excesiva provoca el engrosamiento de las partículas, una separación excesiva y una disminución de la tenacidad. Tras el trabajo en caliente, la separación de fases se alarga a lo largo de la dirección de deformación, formando una estructura fibrosa, y la observación de la sección transversal muestra una distribución estratificada. El recocido promueve la homogeneización de la separación de fases, lo que resulta en precipitados finos y dispersos.

La velocidad de enfriamiento afecta el fenómeno de separación; el enfriamiento rápido garantiza una separación fina, mientras que el enfriamiento lento produce un ligero crecimiento de partículas. Las impurezas se aglomeran en los límites de fase como manchas oscuras; la purificación reduce este fenómeno. La observación de la separación de fases en mandriles de remaches de aleación de tungsteno revela el proceso de formación de estructuras compuestas. El análisis microscópico guía los ajustes del proceso, contribuye a la estabilidad del rendimiento del mandril y le permite desempeñar un papel importante en las herramientas de remachado.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 1.4 Fundamentos teóricos de las varillas con remaches de aleación de tungsteno

Los mandriles para remaches de aleación de tungsteno se basan principalmente en el análisis de diagramas de fases de aleación y principios termodinámicos. Estos fundamentos ayudan a explicar los cambios de comportamiento del material durante su preparación y uso. Los diagramas de fases proporcionan un marco de referencia para las interacciones entre elementos, revelando la solubilidad y el equilibrio de fases del tungsteno con metales auxiliares, mientras que la termodinámica analiza la viabilidad y la estabilidad del proceso desde una perspectiva energética. La aplicación de esta base teórica hace que el diseño de mandriles sea más científico; desde la selección de la composición hasta los parámetros del proceso, todo se basa en datos de diagramas de fases y cálculos energéticos, evitando ajustes a ciegas.

La teoría del diagrama de fases en mandriles se refleja en la predicción de la región de fase líquida de los sistemas tungsteno-níquel-hierro o tungsteno-níquel-cobre. La temperatura de sinterización se establece con referencia al diagrama de fases para garantizar la presencia de una cantidad adecuada de fase líquida, lo que promueve la reorganización de las partículas. Los principios termodinámicos implican cambios en la energía libre de Gibbs, que impulsan el mecanismo de disolución-reprecipitación; la densificación de la microestructura del mandril depende de un proceso de energía libre negativa. El fundamento teórico también incluye el concepto de energía interfacial; la reducción de la energía superficial de las partículas de tungsteno promueve la esferoidización, de la cual se beneficia la resistencia al impacto del mandril.

El equilibrio termodinámico guía la liberación de tensiones durante el recocido, y la tensión residual en el mandril minimiza la energía mediante difusión. La combinación de diagramas de fases y termodinámica analiza la estabilidad del mandril a alta temperatura, y los cálculos de la tasa de difusión de elementos ayudan a optimizar el tiempo de mantenimiento. La base teórica de los mandriles de aleación de tungsteno encarna la naturaleza multidisciplinaria de la ciencia de los materiales, respaldando la predicción del rendimiento de las herramientas mediante diagramas de fases y principios energéticos, y proporcionando soporte teórico para aplicaciones de remachado.

##### 1.4.1 Aplicación de diagramas de fases de aleación en varillas de remache de aleación de tungsteno

La aplicación de diagramas de fases de aleación en mandriles de remaches de aleación de tungsteno guía principalmente el diseño de la composición y la selección de los parámetros del proceso. Esta aplicación ayuda a predecir el equilibrio de fases entre elementos y el comportamiento dependiente de la temperatura, asegurando una microestructura estable del mandril y un rendimiento constante. El diagrama de fases representa las regiones miscibles del tungsteno con metales auxiliares como el níquel y el hierro. La composición del mandril se establece dentro del límite de solución sólida para evitar la formación de fases perjudiciales. La región de fase líquida se utiliza en el proceso de sinterización; el calentamiento del mandril a la temperatura mostrada en el diagrama de fases promueve la fusión y humectación de la fase aglutinante y las partículas de tungsteno, logrando la reorganización y la densificación.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los diagramas de fases también se aplican en la etapa de tratamiento térmico. La temperatura de recristalización se estima a partir del diagrama de fases, y el recocido del mandril evita temperaturas excesivamente altas que podrían provocar engrosamiento. El diagrama de fases binario de tungsteno-níquel muestra la separación a baja temperatura; durante el enfriamiento del mandril, el diagrama de fases guía el control de la precipitación, manteniendo una distribución fina y mejorando la tenacidad. El diagrama de fases de tungsteno-hierro se utiliza para ajustar el magnetismo; en entornos no magnéticos, el mandril reduce el contenido de hierro para que coincida con la región no magnética del diagrama de fases. Para extensiones de múltiples elementos del diagrama de fases, como la fase ternaria de tungsteno-níquel-hierro, la optimización de la relación del mandril hace referencia a la línea de liquidus, equilibrando la humectación y la resistencia. En estas aplicaciones, el software de simulación de diagramas de fases asiste en la predicción, y los experimentos con mandriles verifican los datos del diagrama de fases. La aplicación de diagramas de fases en mandriles demuestra la guía de la teoría para la práctica, respaldando la confiabilidad de la preparación del material a través del análisis de equilibrio y aportando valor práctico en el campo de las herramientas de remachado.

#### 1.4.2 Influencia de los principios termodinámicos en las varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno

Los principios termodinámicos que afectan a los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se manifiestan principalmente al determinar la viabilidad y estabilidad del proceso mediante cambios de energía. Esta influencia persiste desde la sinterización hasta su uso, lo que facilita el análisis del mecanismo de comportamiento del mandril. El principio de energía libre de Gibbs impulsa la formación de la fase líquida durante la sinterización; los valores negativos promueven la reorganización de las partículas, y la densificación del mandril depende de la ruta de minimización de energía. Los cambios en la entalpía influyen en el proceso de calentamiento; a medida que la temperatura del mandril aumenta, absorbe calor, y la fusión de la fase aglutinante proporciona la energía de flujo.

El principio del aumento de entropía se manifiesta en la difusión; durante el tratamiento térmico del mandril, la distribución aleatoria de elementos aumenta el valor de entropía, lo que resulta en una unión de interfaz más estable. La termodinámica del equilibrio de fases guía el ajuste de la composición, y la relación de elementos auxiliares del mandril se basa en la curva de energía libre para evitar la formación de fases de alta energía. Los efectos termodinámicos también incluyen la liberación de tensión; durante el recocido del mandril, la energía residual se reduce mediante difusión, restaurando el rendimiento. En aplicaciones de impacto, el análisis termodinámico de la transferencia de energía ayuda a concentrar la energía cinética, y el proceso de deformación sigue la ley de conservación de la energía. La termodinámica de la oxidación predice el comportamiento de la superficie, y el cálculo de la energía libre del mandril en el aire guía la protección del recubrimiento. La influencia de los principios termodinámicos en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno refleja una comprensión basada en la energía de los materiales, y la aplicación de estos principios apoya la optimización del rendimiento de la herramienta, desempeñando un papel rector en la práctica del remachado.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Capítulo 2 Clasificación y análisis relacionado de las tapas de remaches de aleación de tungsteno

### 2.1 Clasificación de las tapas de remaches de aleación de tungsteno según su composición

Los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se clasifican principalmente según los diferentes elementos de la fase aglutinante, lo que refleja las diferencias sistemáticas en densidad, tenacidad, procesabilidad y coste. Las categorías comunes incluyen sistemas de tungsteno-níquel-hierro (TNI), sistemas de tungsteno-níquel-cobre (TNC) y otras variantes. El tungsteno es el elemento predominante con una alta proporción, y la proporción de elementos de la fase aglutinante se ajusta para equilibrar el rendimiento. Los sistemas TNI priorizan la resistencia mecánica y las propiedades magnéticas, mientras que los sistemas TNC priorizan las propiedades no magnéticas y la conductividad térmica. Las categorías de alta densidad buscan maximizar el contenido de tungsteno.

La clasificación se basa en diagramas de fases y comportamiento de sinterización. El níquel, como elemento aglutinante básico, es mutuamente soluble con otros metales para formar soluciones sólidas. La adición de hierro o cobre altera las propiedades de la fase. En la producción, la clasificación composicional guía la formulación de polvos y las rutas de proceso. Los sistemas de tungsteno-níquel-hierro presentan temperaturas de sinterización en fase líquida más altas, mientras que los sistemas de tungsteno-níquel-cobre son más fáciles de trabajar en frío. La clasificación también considera la adaptabilidad a la aplicación; las varillas de empuje magnéticas son adecuadas para aplicaciones de sujeción específicas, mientras que las varillas de empuje no magnéticas se utilizan para el ensamblaje electrónico. El control de impurezas es universal en la clasificación, con un bajo contenido de oxígeno y carbono para evitar la fragilización.

clasificación basada en la composición proporciona un marco para la selección de mandriles. Los ingenieros clasifican las categorías según el material del remache y las condiciones de operación; los sistemas de tungsteno-níquel-hierro ofrecen alta resistencia al impacto, mientras que los sistemas de tungsteno-níquel-cobre proporcionan estabilidad superficial. El sistema de clasificación se amplía con la investigación de materiales, y el dopaje con tierras raras o cobalto forma nuevas ramas.

#### 2.1.1 Barra superior de remache de aleación de tungsteno de alta densidad

Los mandriles para remaches de aleación de tungsteno de alta densidad se caracterizan por su alto contenido de tungsteno. Estos mandriles aprovechan la ventaja de la masa concentrada en el soporte del remache, lo que proporciona una mayor fuerza de reacción inercial y una mayor eficiencia de transferencia de energía, lo que resulta en una deformación del remache más uniforme y completa. El diseño de alta densidad se logra reduciendo la proporción de la fase aglutinante, con partículas de tungsteno predominantes en la composición. Tras la sinterización, la microestructura es densa con menos poros, lo que resulta en una mayor masa total para el mismo volumen y una fuerza de reacción al impacto más estable.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La estructura del mandril de alta densidad se compone principalmente de un esqueleto de tungsteno, con una fina capa de aglutinante que encapsula las partículas, lo que resulta en una unión interfacial firme. La superficie de trabajo del mandril presenta una alta dureza, resistiendo la indentación repetida en la cola del remache. Durante el procesamiento, la palanquilla de alta densidad se lamina en caliente y se conforma; el trabajo en frío requiere un recocido auxiliar para liberar la tensión y evitar el agrietamiento. Tras el rectificado superficial, la superficie queda lisa, lo que reduce la adherencia del remache. El mandril presenta baja vibración y un funcionamiento estable cuando se utiliza en equipos de remachado de alta velocidad.

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno de alta densidad son adecuados para sujetar remaches grandes o de alta resistencia. La alta densidad del tungsteno concentra la energía en el remache, lo que resulta en una resistencia de conexión constante. Presentan una buena estabilidad térmica, con mínima deformación durante el calentamiento localizado, lo que prolonga la vida útil del mandril. También poseen una gran estabilidad química, lo que reduce la corrosión en entornos de taller y requiere un mantenimiento mínimo. Las variedades de alta densidad también incluyen variantes de tungsteno-níquel-hierro para posicionamiento asistido magnéticamente y variantes de tungsteno-níquel-cobre para aplicaciones no magnéticas en ensamblaje electrónico.

En la producción, se utiliza polvo fino de tungsteno para aumentar la densidad de las cabezas de remache de alta densidad, y la sinterización y el mantenimiento prolongados promueven la reorganización. El tratamiento térmico ajusta la microestructura y el recocido refina los granos para equilibrar la tenacidad. Estas propiedades de las cabezas de remache de alta densidad se deben a las ventajas del tungsteno, que proporciona un soporte fiable en las herramientas de remachado y se está convirtiendo gradualmente en una opción común para aplicaciones de alta resistencia. Con la diversificación de los requisitos de montaje, la gama de aplicaciones de las cabezas de remache de aleación de tungsteno de alta densidad también se está ampliando, lo que aporta mejoras prácticas a los procesos de conexión.

### **2.1.2 Barra superior de remache de aleación de tungsteno de baja densidad**

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno de baja densidad son una categoría de variante que reduce la densidad general ajustando la proporción de la composición o introduciendo elementos ligeros. Estos mandriles mantienen un equilibrio entre la dureza básica y la tenacidad de la aleación de tungsteno a la vez que reducen el peso, lo que facilita la gestión de la carga del operador y del equipo. Los diseños de baja densidad suelen reducir el contenido de tungsteno o sustituirlo parcialmente por molibdeno, lo que resulta en una proporción correspondientemente mayor de la fase aglutinante. La microestructura posterior a la sinterización sigue siendo un compuesto de dos fases, pero el esqueleto de partículas de tungsteno es relativamente escaso, mientras que la red de cobre o níquel es más continua. Aunque la dureza de la superficie de trabajo del mandril es ligeramente inferior a la del tipo de alta densidad, es suficiente para soportar los impactos típicos del remachado y el desgaste de la superficie es uniforme.

Los mandriles de aleación de tungsteno de baja densidad están dominados por una fase aglutinante, cuya característica principal es la coordinación de la deformación. Las partículas de tungsteno proporcionan

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



el soporte necesario, lo que resulta en una absorción de energía más suave durante el impacto y una reducción del juego del equipo. Su mejor maquinabilidad facilita el laminado en frío y en caliente para lograr formas de barras de paredes delgadas o largas, y un conformado flexible de las caras finales. La estabilidad térmica sigue dependiendo de la fase de tungsteno o molibdeno, con un cambio de forma mínimo durante el calentamiento localizado. Su buena estabilidad química facilita el chapado o pulido de la superficie, resistiendo la corrosión del entorno del taller.

Estos mandriles son adecuados para equipos de remachado ligeros o para operación manual. Su bajo peso reduce la fatiga del operador y su inercia moderada facilita la formación precisa de remaches. La variante de molibdeno-cobre ofrece una mejor conductividad térmica, lo que resulta en una rápida disipación del calor y un bajo aumento de temperatura durante el funcionamiento continuo. La categoría de baja densidad también incluye pseudoaleaciones de tungsteno-cobre, donde la fase de cobre mejora continuamente la conductividad y los mandriles no presentan interferencias magnéticas en el ensamblaje electrónico. Durante la producción, el polvo de mandril de baja densidad se mezcla más fácilmente, tiene un rango de temperatura de sinterización más amplio y simplifica el control del proceso.

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno de baja densidad se han extendido a herramientas portátiles o estaciones de trabajo ligeras en líneas automatizadas, donde su ligereza facilita su manejo cuando se requieren cambios frecuentes de mandril. Existe una variedad de tratamientos superficiales, incluyendo el recubrimiento químico que mejora la apariencia y la resistencia a la corrosión. Estas características de los mandriles de baja densidad se derivan de la optimización del material mediante ajustes de composición, lo que proporciona una opción ligera para soportes de remachado y se convierte gradualmente en una herramienta práctica para aplicaciones específicas. Con la tendencia hacia el ensamblaje ligero, el ámbito de aplicación de esta categoría también se está expandiendo, aportando un valor flexible a los procesos de conexión.

### 2.1.3 Varilla superior con remache de aleación de tungsteno dopado con tierras raras

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno dopados con tierras raras son una categoría especial optimizada mediante la adición de trazas de elementos de tierras raras como el lantano, Itrio o cerio. Estos mandriles refinan la microestructura de las aleaciones tradicionales de tungsteno, mejorando la estabilidad a altas temperaturas y la resistencia a la fatiga. El dopaje de tierras raras se suele añadir al polvo en forma de óxidos y se dispersa en la fase aglutinante o interfaz durante la sinterización. Químicamente, las tierras raras capturan las impurezas de oxígeno y azufre, formando compuestos estables y purificando los límites de grano para reducir las fuentes de fragilidad.

Los mandriles dopados con tierras raras se centran principalmente en el refinamiento del grano y el refuerzo de la interfaz. La fijación de tierras raras en los límites de grano dificulta la migración, aumenta la temperatura de recristalización y mantiene una microestructura fina tras el trabajo en caliente, lo que resulta en una alta resistencia y durabilidad. Las partículas de tungsteno presentan una esferoidización más completa y la fase aglutinante se encapsula uniformemente, lo que produce una distribución de tensiones más equilibrada durante el impacto. Se mejoran las propiedades superficiales, ya que la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aglomeración de tierras raras forma una fina capa protectora que mejora la resistencia a la oxidación del mandril.

Este tipo de mandril es adecuado para aplicaciones de remachado a alta temperatura o de larga duración. No se engrosa durante el calentamiento por fricción local y su dureza disminuye lentamente. El dopaje con tierras raras también mejora la resistencia a la fatiga; la propagación de microfisuras es lenta bajo impactos repetidos, lo que resulta en una vida útil más estable del mandril. Durante el procesamiento, el mandril dopado presenta una trabajabilidad en frío ligeramente mejor y es menos propenso al astillado de los bordes. Además, posee una gran estabilidad química, ya que las tierras raras inhiben el inicio de la corrosión.

Los mandriles de remaches de aleación de tungsteno dopados con tierras raras requieren controlar la uniformidad de los niveles de dopaje, mediante molienda de bolas de polvo o secado por aspersión que facilitan su distribución. El tratamiento térmico activa el mecanismo de dopaje, y la precipitación por envejecimiento mejora aún más la fase de tierras raras. Estas propiedades de los mandriles dopados con tierras raras se derivan del principio de microaleación de la ciencia de los materiales, lo que proporciona mejoras en el rendimiento de las herramientas de remachado y se está convirtiendo gradualmente en la opción preferida para aplicaciones exigentes. A medida que avanza la investigación, esta categoría de dopaje se perfecciona, lo que contribuye a la posible expansión de la funcionalidad del mandril.

## 2.2 Clasificación basada en la aplicación de las barras superiores de remaches de aleación de tungsteno

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno se clasifican principalmente según su aplicación y condiciones de trabajo, lo que refleja su diversa adaptabilidad a diferentes entornos de remachado. En el mecanizado, se priorizan la resistencia al impacto y la vida útil, mientras que en los instrumentos de precisión, se priorizan la precisión y la estabilidad. La clasificación se basa en la dureza, la densidad y las propiedades superficiales del mandril. Los mandriles de mecanizado tienen un alto contenido de tungsteno para resistir el desgaste, mientras que los mandriles de instrumentos de precisión presentan una microestructura uniforme para evitar la microdeformación.

La clasificación también considera el material del remache y el tipo de equipo; los remaches de aleación de aluminio se utilizan con mandriles de baja dureza, mientras que los remaches de acero requieren mandriles de alta resistencia. En producción, la clasificación guía el diseño de la cara final y el tratamiento de la superficie de trabajo; en aplicaciones mecánicas, las superficies cóncavas se adaptan a la deformación, mientras que en aplicaciones de precisión, las superficies planas proporcionan un soporte temporal. El sistema de clasificación evoluciona con la tecnología de ensamblaje, incorporando elementos compatibles con la automatización. La clasificación basada en aplicaciones de mandriles de aleación de tungsteno proporciona un marco práctico para la selección, facilita la optimización de los procesos de remachado mediante la coincidencia de dominios y desempeña un papel importante en el ensamblaje industrial.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 2.2.1 Remachadores de aleación de tungsteno utilizados en el mecanizado

En la industria del mecanizado, los mandriles de remache de aleación de tungsteno son herramientas diseñadas específicamente para remaches de alta resistencia. Estos mandriles actúan como soporte inverso en máquinas herramienta o pistolas remachadoras manuales, resistiendo impactos de cargas pesadas y ayudando a que los remaches formen una unión sólida en la chapa metálica. El mandril tiene un gran diámetro y una superficie de trabajo plana o ligeramente cóncava para acomodar la expansión de la cola del remache, mientras que sus lados lisos reducen la fricción del equipo. La alta dureza de la aleación de tungsteno permite que el mandril resista las indentaciones repetidas de remaches de acero o aluminio, y su desgaste superficial es lento, lo que lo hace adecuado para entornos de producción en masa. En el mecanizado, estos pasadores expulsores se utilizan comúnmente para remachar carrocerías de automóviles, componentes navales o estructuras de acero para la construcción. El esqueleto de partículas de tungsteno proporciona rigidez, mientras que la fase de unión absorbe la energía de la vibración, evitando el astillado de los bordes. El diseño de la cara final se ajusta según el tipo de remache: un tipo de cabeza plana admite remaches ciegos, mientras que un tipo de cabeza cóncava ayuda al remache autoperforante. El pasador expulsor se fija a una pistola remachadora neumática; bajo alta presión de operación, la fuerza de reacción inercial se concentra, lo que resulta en una deformación uniforme del remache. Presenta una fuerte estabilidad química, resiste la contaminación por refrigerante o aceite, y se puede limpiar para restaurar su suavidad.

En el campo del mecanizado, se utilizan mandriles de longitud ajustable; los cortos se emplean manualmente, mientras que los largos se emplean en líneas automatizadas. Tras el tratamiento térmico, la microestructura se vuelve fibrosa, lo que resulta en una alta resistencia axial y resistencia a la flexión bajo fuerzas laterales. Un tratamiento superficial cepillado aumenta la fricción de agarre y facilita la sustitución. La aplicación de mandriles de aleación de tungsteno en este campo mejora la eficiencia del remachado, reduce el tiempo de inactividad por mantenimiento y garantiza una calidad de conexión constante. Los sistemas de tungsteno-níquel-hierro de alta densidad se utilizan comúnmente en producción, con posicionamiento asistido magnéticamente. Estas características de adaptabilidad se derivan de la combinación de materiales y procesos, lo que proporciona un soporte fiable en el montaje mecánico. El mantenimiento de estos mandriles incluye la inspección periódica de las abolladuras de la superficie de trabajo y el pulido para restaurar la suavidad. La resistencia a la fatiga de las aleaciones de tungsteno garantiza un rendimiento estable en el remachado de alta frecuencia, lo que resulta en cabezas de remache estéticamente atractivas. Las aplicaciones se extienden al mantenimiento de maquinaria pesada, donde los mandriles resisten el impacto de remaches de gran diámetro sin deformarse.

### 2.2.2 Barras superiores remachables de aleación de tungsteno para uso en instrumentos de precisión

En el campo de los instrumentos de precisión, los mandriles de remache de aleación de tungsteno son herramientas especializadas para remachado en miniatura o de alta precisión. Estos mandriles tienen un diámetro pequeño y una superficie de trabajo lisa como un espejo, lo que sirve como soporte para garantizar una deformación precisa y sin daños del remache en piezas pequeñas. El cuerpo del mandril

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



es corto y preciso, con una cara final plana para evitar rayar las superficies de precisión y lados pulidos para reducir la resistencia de operación. La estructura uniforme de la aleación de tungsteno garantiza una densidad constante en el mandril, una fuerza de reacción estable al impacto y una forma simétrica de la cabeza del remache.

En instrumentos de precisión, estos mandriles se utilizan para remachar dispositivos electrónicos, médicos o instrumentos ópticos. Las partículas de tungsteno finamente distribuidas garantizan una unión uniforme y una deformación mínima, evitando picaduras en la superficie de trabajo. El diseño de la cara final enfatiza la planitud, asegurando una distribución uniforme de la presión al sujetar microrremaches. Con alta inercia química, el mandril es resistente a entornos de sala limpia, lo que evita el desprendimiento de partículas y la contaminación de los componentes. Montados en pistolas remachadoras de precisión manuales o eléctricas, requieren poca fuerza de operación y su inercia moderada permite un control preciso de la deformación. En el campo de los instrumentos de precisión, la longitud del mandril es crucial, y los mandriles más cortos facilitan la operación en espacios reducidos. El tratamiento térmico refina el tamaño del grano, lo que hace que el mandril sea resistente a la microfata y mantenga su forma durante un uso prolongado. La galvanoplastia o pasivación superficial mejora la compatibilidad, asegurando que el mandril no reaccione con los materiales del instrumento. La aplicación de mandriles de aleación de tungsteno en este campo garantiza la precisión del remachado, evita el aflojamiento de las conexiones y asegura el funcionamiento estable del instrumento. Durante la producción, el sistema de tungsteno-níquel-cobre es amagnético, lo que lo hace adecuado para el ensamblaje electrónico. La baja expansión térmica de la aleación de tungsteno garantiza la estabilidad dimensional ante cambios de temperatura, garantizando así la precisión del posicionamiento del remache. Sus aplicaciones se extienden a instrumentos aeroespaciales y equipos de laboratorio, donde el diseño en miniatura del mandril se adapta a las limitaciones de espacio. El posicionamiento de los mandriles de remache de aleación de tungsteno en instrumentos de precisión refleja el valor de la herramienta en el refinamiento del material, optimizando conexiones pequeñas mediante un soporte de precisión y desempeñando un papel fundamental en el ensamblaje de alta tecnología.

### 2.2.3 Barra superior con remache de aleación de tungsteno para entornos de alta temperatura

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno, específicos para entornos de alta temperatura, son un tipo de herramienta optimizada para el trabajo en caliente o el remachado a alta temperatura. Estos mandriles deben soportar altas temperaturas localizadas y ciclos térmicos durante el remachado, manteniendo la estabilidad de la forma y la precisión de soporte. El diseño del mandril prioriza la estabilidad térmica, con un alto contenido de tungsteno para mejorar el soporte del punto de fusión. Se selecciona una fase aglutinante resistente al calor, lo que resulta en una microestructura densa después de la sinterización y reduce la tendencia al ablandamiento térmico. La superficie de trabajo es plana o ligeramente cóncava y se somete a un tratamiento térmico especial para formar una capa resistente a altas temperaturas que resiste la generación de calor por fricción.

En el remachado de alta temperatura, este tipo de mandril se utiliza para remachar en caliente o conectar metales calientes. El esqueleto de partículas de tungsteno mantiene la rigidez a altas temperaturas,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mientras que las fases de cobre o níquel coordinan la expansión térmica, evitando la deformación y el agrietamiento. El diseño de la cara final considera la conducción térmica, lo que permite una rápida disipación del calor y reduce su acumulación, lo que resulta en un bajo aumento de temperatura durante el uso continuo. Presenta una gran estabilidad química; la superficie del mandril forma una capa antioxidante pasivada, natural o artificial, que resiste la corrosión por gases a alta temperatura. Su longitud moderada facilita el uso con equipos de alta temperatura, y el extremo fijo es compatible con materiales resistentes al calor.

El desarrollo de mandriles para entornos de alta temperatura incluye el recocido a alta temperatura, que refina los granos para mejorar la resistencia a la fatiga térmica. Los mandriles presentan una propagación lenta de microfisuras bajo choques térmicos repetidos. Los recubrimientos superficiales o el refuerzo por dispersión mejoran aún más la resistencia al calor, garantizando la estabilidad de los mandriles en medios de petróleo o gas a alta temperatura. La aplicación de mandriles de aleación de tungsteno en este campo mejora la fiabilidad de las conexiones de trabajo en caliente, lo que resulta en una formación uniforme de remaches y una calidad de conexión constante.

Estos mandriles de remache se centran en la inspección de la oxidación superficial tras el enfriamiento y pulido para restaurar un acabado liso. La variante de alta densidad presenta una fuerte inercia, lo que garantiza una eficiente transferencia de energía durante el remachado en caliente. La categoría de mandriles de remache de aleación de tungsteno, específica para altas temperaturas, refleja la adaptabilidad de ingeniería del diseño resistente al calor del material, proporcionando un soporte estable durante el ensamblaje en caliente y convirtiéndose gradualmente en una opción práctica para el remachado a alta temperatura. Con los avances en la tecnología de trabajo en caliente, la aplicación de estos mandriles se está expandiendo, aportando valor a la resistencia térmica del proceso de unión.

#### 2.2.4 Barra superior con remache de aleación de tungsteno para entornos de desgaste

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno para entornos abrasivos son herramientas reforzadas diseñadas para condiciones de alta fricción o impacto abrasivo. Estos mandriles resisten el desgaste superficial, mantienen una superficie de trabajo lisa y garantizan la precisión al remachar materiales duros o realizar operaciones de alta frecuencia. El cuerpo del mandril presenta una alta dureza, reforzado con partículas de tungsteno dispersas o endurecido superficialmente, y la fase aglutinante mantiene un equilibrio de tenacidad para evitar el astillado. La superficie de trabajo está pulida a espejo o microtexturizada para reducir la adhesión del remache y la incrustación abrasiva. En entornos abrasivos, estos mandriles se utilizan para remachar acero inoxidable, aleaciones de titanio o materiales compuestos. La fase de tungsteno resiste los arañazos abrasivos y la formación de picaduras superficiales es lenta. El diseño de la cara plana admite remaches de gran superficie, y el recubrimiento resistente al desgaste en los laterales reduce la fricción del equipo. Con una buena estabilidad química, el mandril es resistente a la abrasión por refrigerante y la superficie es menos propensa a las ranuras de desgaste. La longitud es ajustable según el equipo y el extremo fijo está reforzado para evitar que se afloje.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Entre los mandriles diseñados específicamente para entornos abrasivos se incluyen la implantación de iones superficiales o el recubrimiento de carburo, lo que resulta en una mayor resistencia al desgaste mediante un gradiente de dureza y una mayor vida útil en el remachado de alta frecuencia. El tratamiento térmico refina el tamaño del grano, mejorando aún más la resistencia a la fatiga y al desgaste. El uso de mandriles de aleación de tungsteno en este campo aumenta la durabilidad, y la forma uniforme de la cabeza del remache reduce la frecuencia de reemplazo.

Estos remachadores incluyen la inspección regular de la rugosidad de la superficie, el pulido o el recubrimiento de retoque. El sistema de tungsteno-níquel-hierro ofrece una alta dureza, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de alto desgaste. La categoría específica para el desgaste de los remachadores de aleación de tungsteno refleja la optimización de ingeniería del diseño resistente al desgaste del material, proporcionando un soporte fiable en condiciones de fricción extremas y convirtiéndose gradualmente en una herramienta común para el remachado de alta durabilidad.

### 2.3 Análisis de la diferencia de rendimiento de los tipos de varillas con remaches de aleación de tungsteno

Los tipos de mandriles para remaches de aleación de tungsteno se basan principalmente en la comparación de su composición, aplicación y variaciones estructurales. Este análisis ayuda a comprender el énfasis en el rendimiento de las diferentes categorías en los soportes de remachado. Los tipos de alta densidad presentan una alta densidad y una fuerte fuerza de reacción inercial, lo que los hace adecuados para impactos intensos. Su transferencia de energía es concentrada y la deformación del remache es uniforme. Los tipos de baja densidad son ligeros, flexibles en su funcionamiento, adecuados para equipos ligeros, presentan baja vibración y un buen control de precisión.

Los tipos dopados con tierras raras presentan una microestructura refinada, mayor resistencia a la fatiga y al calor, lo que resulta en una menor microdegradación del expulsor durante el ciclo térmico o el uso prolongado. Los tipos específicos para mecanizado ofrecen alta dureza, resistencia al desgaste y una larga vida útil de la superficie de trabajo del expulsor. Los tipos específicos para instrumentos de precisión presentan buena uniformidad, mínima microdeformación y alta precisión de soporte del expulsor. Los tipos específicos para alta temperatura presentan altas temperaturas de reblandecimiento, formas estables y un rendimiento estable bajo choque térmico. Los tipos específicos para desgaste se caracterizan por un refuerzo superficial, una alta resistencia al rayado y durabilidad en entornos de fricción.

Las diferencias de rendimiento también se reflejan en la maquinabilidad y el mantenimiento; los tipos de alta densidad requieren asistencia térmica para su procesamiento, mientras que los de baja densidad son más fáciles de trabajar en frío. Los tipos dopados con tierras raras presentan una buena respuesta al recocido y requieren tratamientos superficiales mecánicos más especializados. Este análisis de diferencias orienta la selección: los tipos de alta densidad son para aplicaciones de alta resistencia, los de baja densidad para aplicaciones ligeras y los de tierras raras para aplicaciones de alta temperatura y entornos de desgaste severo. El análisis de las diferencias de rendimiento de los tipos de mandriles de aleación de tungsteno refleja la importancia del diseño de clasificación para la ciencia de los materiales,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

lo que facilita las aplicaciones específicas de las herramientas y ofrece diversas opciones en la práctica del remachado.

### 2.3.1 Efecto de la variación de la composición en las propiedades físicas de las varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno

Los cambios en la composición de las propiedades físicas de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se reflejan principalmente en el ajuste de la densidad, la estabilidad térmica y las características de la superficie, lo que proporciona diversas opciones de rendimiento para diferentes aplicaciones. El aumento del contenido de tungsteno aumenta la densidad general del mandril, lo que resulta en una distribución de masa más concentrada. Esto proporciona una fuerza de reacción inercial más estable durante el impacto del remachado, lo que lleva a una deformación más uniforme en la cola del remache. El ajuste de la proporción de la fase de unión altera el comportamiento de expansión térmica. Cuando domina el sistema níquel-hierro, el mandril exhibe una excelente estabilidad dimensional en condiciones de temperatura variables. El cambio a un sistema níquel-cobre mejora la conductividad térmica, lo que permite una disipación más rápida del calor por fricción localizado y reduce el aumento de temperatura en la superficie de trabajo.

Los cambios en la composición también afectan la humectabilidad superficial y la estabilidad química. Un mayor contenido de cobre facilita la formación de una capa protectora uniforme sobre la superficie del mandril, resistiendo la corrosión causada por aceites de taller o agentes de limpieza, mientras que la adición de hierro contribuye a la formación de una película de óxido densa, mejorando la resistencia a la corrosión atmosférica. El dopaje de trazas con tierras raras purifica los límites de grano del mandril, mejorando su estabilidad estructural bajo ciclos térmicos y reduciendo la probabilidad de microfisuras en la superficie. Los ajustes en la composición también afectan la distribución de la tensión residual después del procesamiento; una proporción adecuada de níquel-cobre puede reducir la tensión interna, permitiendo que el mandril mantenga su forma de forma más estable durante el uso repetido. En la producción real, las variaciones en la composición se logran mediante la dosificación del polvo y los parámetros de sinterización. La adaptación del tamaño de partícula del polvo de tungsteno con el polvo de la fase aglutinante refina aún más el impacto en el rendimiento. Bajo las mismas condiciones de remachado, los mandriles con diferentes composiciones muestran una transferencia de energía más concentrada en los tipos de mayor densidad, un mejor control del aumento de temperatura en los tipos con mejor conductividad térmica y ciclos de mantenimiento más largos en los tipos con alta resistencia a la corrosión. La influencia de las variaciones de composición en las propiedades físicas de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona flexibilidad en la selección de herramientas. Una dosificación adecuada satisface diversos requisitos, como el mecanizado, el ensamblaje de precisión y los entornos de alta temperatura, lo que demuestra una gran adaptabilidad en la práctica del remachado.

### 2.3.2 Diseño orientado a la aplicación reflejado en mandriles de remaches de aleación de tungsteno

El diseño orientado a la aplicación en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se refleja principalmente en la optimización específica de sus dimensiones, forma de la superficie de trabajo y

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



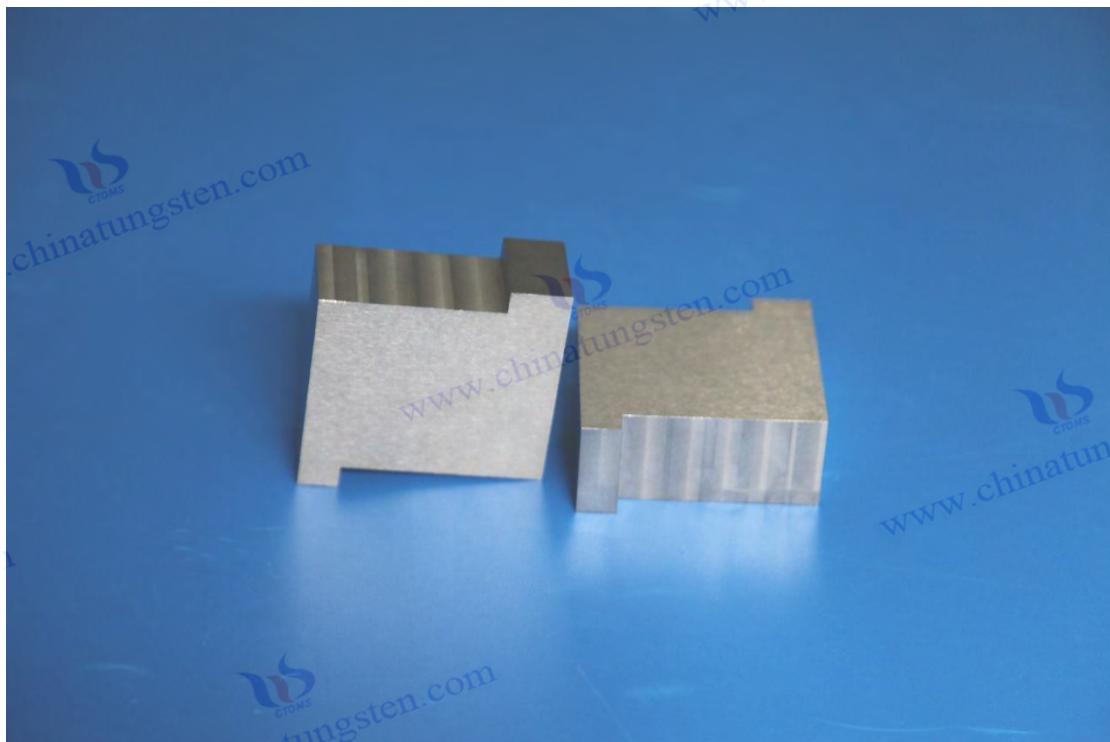
tratamiento superficial. Esta filosofía de diseño permite que el mandril se adapte mejor a condiciones de remachado específicas, mejorando la eficiencia operativa y la calidad de la conexión. Los mandriles utilizados en mecanizado suelen presentar diámetros mayores y extremos de trabajo cóncavos para acomodar la gran deformación de la cola del remache de alta resistencia. La longitud del mandril es moderada para facilitar la fijación con una remachadora neumática, mientras que las texturas antideslizantes en los laterales facilitan el ajuste manual. En el campo de los instrumentos de precisión, se prefiere un mandril delgado y una superficie de trabajo plana para garantizar un soporte preciso de remaches miniatura, con una superficie pulida a espejo para evitar rayar los componentes sensibles. Los mandriles específicos para entornos de alta temperatura están diseñados teniendo en cuenta la disipación de calor. Las ranuras poco profundas en la superficie de trabajo promueven el flujo de aire, el cuerpo del mandril está hecho de una fase de unión resistente al calor y los extremos están recubiertos con una capa aislante del calor para reducir la transferencia de calor al equipo. Los mandriles específicos para entornos abrasivos cuentan con una superficie de trabajo endurecida o microtexturizada para aumentar el espesor de la capa resistente al desgaste y extremos fijos reforzados para soportar impactos de mayor frecuencia. El diseño guiado por la aplicación se extiende al método de fijación; algunos mandriles tienen interfaces de bloqueo rápido o roscadas para una integración perfecta con equipos automatizados. El tratamiento de la superficie también refleja la orientación de la aplicación. Los mandriles de mecanizado a menudo utilizan recubrimientos resistentes al aceite, mientras que los mandriles de instrumentos de precisión eligen recubrimientos brillantes que evitan el desprendimiento de partículas. Los mandriles de alta temperatura están recubiertos además con un recubrimiento antioxidante. La relación longitud-diámetro se adapta según las especificaciones del remache; los tipos cortos y gruesos son adecuados para cargas pesadas, mientras que los tipos largos y delgados son beneficiosos para el funcionamiento en espacios reducidos. Este diseño orientado a la aplicación en mandriles de remache de aleación de tungsteno transforma la herramienta de uso general a una herramienta especializada. Mediante la coordinación de la estructura y el tratamiento, se mejora la adaptabilidad de los procesos de remachado, lo que resulta práctico en diversos escenarios industriales.

### **2.3.3 El efecto de las diferencias microestructurales en las propiedades mecánicas de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno**

Las diferencias microestructurales en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno influyen principalmente en sus propiedades mecánicas a través del tamaño de las partículas de tungsteno, la distribución de la fase aglutinante y la unión interfacial. Este control microestructural determina la resistencia, tenacidad y resistencia a la fatiga del mandril bajo cargas de impacto. Los mandriles de alta densidad presentan partículas de tungsteno más finas y uniformemente distribuidas, con una fina capa de fase aglutinante que forma un esqueleto denso. Esto resulta en una dispersión de tensiones más completa durante el impacto, reduciendo la probabilidad de abolladuras o microfisuras superficiales. Por el contrario, los mandriles de baja densidad presentan un mayor espaciamiento de las partículas de tungsteno, una red de fase aglutinante más continua y una mejor coordinación de la deformación, lo que resulta en una absorción de energía más suave bajo cargas ligeras o entornos de vibración.

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

Los mandriles dopados con tierras raras se caracterizan por la purificación de los límites de grano y el refuerzo de fase dispersa. Los compuestos de tierras raras fijan los límites de grano, lo que impide el deslizamiento y mejora la resistencia del mandril a la fatiga por alta temperatura, lo que resulta en una pérdida de resistencia más lenta tras el ciclo térmico. Los mandriles específicos para mecanizado utilizan el endurecimiento superficial para formar una estructura en gradiente, con partículas de tungsteno enriquecidas en la superficie que mejoran la resistencia al desgaste, mientras que la fase aglutinante del núcleo mantiene la tenacidad y previene el astillado por fragilidad en los bordes. Los mandriles específicos para instrumentos de precisión presentan una alta esferoidización de partículas, interfaces limpias sin aglomeración de impurezas, una mínima concentración de tensiones bajo impactos menores y una excelente estabilidad de forma. La textura de la fibra inducida por el trabajo en caliente también es un método de control. El alargamiento del grano en la dirección de laminación mejora la resistencia axial, lo que resulta en una menor tendencia a la flexión del mandril bajo fuerzas laterales. El recocido refina los granos recristalizados, equilibrando la dureza y la plasticidad, y el mandril muestra una buena recuperación del rendimiento tras un uso repetido. Las diferencias microestructurales en el control de las propiedades mecánicas de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporcionan gradientes de rendimiento para diferentes aplicaciones. La optimización microestructural logra un equilibrio razonable entre resistencia y tenacidad, mostrando una respuesta mecánica estable en los soportes de remache. Gracias a los avances en la tecnología de observación, este método de control se mejora continuamente, abriendo nuevas posibilidades para optimizar el rendimiento del mandril.



CTIA GROUP LTD Varilla superior con remache de aleación de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Capítulo 3 Proceso de fabricación de varillas de remache de aleación de tungsteno

### 3.1 Método metalúrgico para varillas de remache de aleación de tungsteno

Los mandriles para remaches de aleación de tungsteno constituyen una cadena de proceso completa, desde la materia prima en polvo hasta las herramientas terminadas. Este método logra la composición de tungsteno y elementos auxiliares mediante mezcla, conformado, sinterización y postratamiento para formar productos en forma de varilla, aptos para el soporte de remaches. La selección del polvo es fundamental. Se mezclan polvo de tungsteno de alta pureza y polvos de fase aglutinante, como níquel-hierro o níquel-cobre, en una proporción específica. El fino tamaño de partícula del polvo de tungsteno mejora la densidad, mientras que la alta actividad del polvo de fase aglutinante favorece la humectación. En la etapa de mezcla, se utiliza un molino de bolas mecánico o un molino en V para una distribución uniforme. Químicamente, se utilizan surfactantes para evitar la aglomeración y garantizar la uniformidad macroscópica de los elementos.

El proceso de conformado consiste en prensar polvos mixtos para formar piezas en bruto con forma de varilla. El prensado isostático en frío se utiliza comúnmente para piezas en bruto de varillas superiores de gran tamaño. El medio líquido transmite la presión de forma isotrópica, lo que resulta en una densidad uniforme de la pieza en bruto y evita gradientes de tensión. El moldeo por compresión es adecuado para lotes pequeños, utilizando un molde de acero con presión unidireccional y lubricante para reducir la fricción. Tras el conformado, la resistencia de la pieza en bruto se mejora mediante un aglutinante temporal, lo que facilita su manipulación.

La sinterización es la base del proceso. El calentamiento al vacío o en atmósfera de hidrógeno provoca la fusión de la fase aglutinante y humedece las partículas de tungsteno al aparecer una fase líquida, lo que provoca su reorganización y densificación. El control de la ventana de temperatura permite un flujo adecuado de la fase líquida, evitando el colapso o la segregación. El período de mantenimiento implica un mecanismo de disolución-reprecipitación para esferoidizar las partículas, lo que resulta en una unión interfacial limpia. El enfriamiento lento fija la microestructura, previniendo el agrietamiento por tensión térmica. El prensado isostático en caliente facilita la sinterización, cerrando los poros y aumentando la densidad del tocho. El trabajo en caliente deforma la palanquilla sinterizada, mediante trefilado o laminado para reducir su diámetro, forjado multidireccional para crear una microestructura uniforme y recocido intermedio para liberar el endurecimiento y restaurar la plasticidad. La cara final del mandril se mecaniza y rectifica hasta obtener una superficie lisa. El tratamiento térmico de envejecimiento por solución precipita las fases, reforzando el mandril para lograr un equilibrio entre resistencia y tenacidad.

El tratamiento de superficies consiste en la limpieza química para eliminar la oxidación, el pulido para mejorar la suavidad y el recubrimiento para mejorar la resistencia a la corrosión. El acabado implica el corte a una longitud fija y la inspección de la densidad dimensional. La flexibilidad del método de pulvimetalurgia permite ajustar los parámetros según las especificaciones del mandril; los tipos de alta densidad prolongan el tiempo de sinterización, mientras que los de baja densidad aumentan la proporción de la fase aglutinante. El método es económico y el polvo residual puede reciclarse. La aplicación de la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pulvimetalurgia en mandriles de remaches de aleación de tungsteno abarca la ingeniería de materiales, desde el compuesto microscópico hasta el conformado macroscópico. La optimización de la cadena mejora la durabilidad de la herramienta y proporciona una base estable para el soporte del remache. Gracias a los avances tecnológicos, este método también incorpora elementos de automatización, lo que aumenta la eficiencia de la producción de mandriles.

### 3.1.1 Pasos de preparación de materia prima en la preparación de mandriles de remaches de aleación de tungsteno

La preparación de la materia prima en la fabricación de mandriles para remaches de aleación de tungsteno constituye el punto de partida del proceso de pulvimetalurgia. Este paso, mediante la purificación del polvo de tungsteno, el control del tamaño de partícula y la mezcla de los elementos de aleación, garantiza la uniformidad de la microestructura y la consistencia del rendimiento en el conformado y sinterizado posteriores. La preparación de la materia prima prioriza la correspondencia entre la pureza química y las propiedades físicas. El polvo de tungsteno, como componente principal, debe ser altamente puro para evitar defectos inducidos por impurezas, mientras que los polvos de elementos de aleación con alta actividad favorecen la humectación. El proceso comienza con la reducción del tungstato de amonio, continuando con el tamizado y la mezcla del polvo. Químicamente, la reacción de reducción elimina el oxígeno y la mezcla promueve la distribución aleatoria de los elementos.

El proceso de preparación incluye la preparación del polvo de tungsteno, la selección del polvo auxiliar y la homogeneización. El tamaño de partícula del polvo de tungsteno se controla mediante la gradación por reducción de hidrógeno, mientras que los polvos de aleación como el níquel, el hierro y el cobre se preparan mediante métodos de carbonilo o atomización. Antes de mezclar, el polvo se seca para evitar la absorción de humedad, y la limpieza química elimina los contaminantes de la superficie. La sistemática de los pasos de preparación garantiza una composición controlable del mandril, lo que resulta en una base estable de densidad y dureza. La calidad de la materia prima afecta directamente la resistencia al impacto del mandril, y la purificación reduce las fuentes de fragilidad. La flexibilidad de la preparación de la materia prima permite ajustes según el tipo de mandril; los de alta densidad utilizan polvo de tungsteno fino y puro, mientras que los de baja densidad incorporan una fase aglutinante. El polvo se almacena en un ambiente seco para evitar la oxidación y la aglomeración. Los pasos de preparación de la materia prima en la producción de mandriles para remaches de aleación de tungsteno incorporan la gestión de ingeniería de los materiales básicos, lo que facilita el correcto funcionamiento de la cadena de proceso mediante la purificación y la mezcla, y establece una base material fiable para la producción de mandriles. Con los avances tecnológicos, esta preparación también incorpora pesaje y pruebas automatizadas, mejorando la eficiencia y la consistencia.

#### 3.1.1.1 Purificación y control del tamaño de partículas del polvo de tungsteno

Aspectos fundamentales de la preparación de materias primas para mandriles de remaches de aleación de tungsteno. Este control logra una alta pureza y una distribución adecuada del polvo de tungsteno mediante la reducción y el tamizado en múltiples etapas, lo que garantiza una sinterización densa y una

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



microestructura uniforme del mandril. La purificación comienza con la recrystalización del tungstato de amonio para eliminar los metales alcalinos y las impurezas de fósforo y azufre. Tras la calcinación en óxidos, se produce la reducción de hidrógeno, donde el hidrógeno reacciona con los óxidos para generar agua, que posteriormente se descarga. El control del punto de rocío garantiza la eliminación oportuna de la humedad, evitando la reoxidación del polvo de tungsteno. La reducción gradual a bajas temperaturas elimina el agua de cristalización, mientras que a altas temperaturas se forma tungsteno metálico. Este proceso se repite para mejorar la pureza.

El control del tamaño de partícula se refleja en los parámetros de reducción. Las altas temperaturas y la alta velocidad de la nave producen polvo grueso, mientras que las bajas temperaturas y la baja velocidad producen polvo fino. Químicamente, la cinética de reducción afecta el crecimiento del núcleo cristalino, y el ajuste de la concentración de humedad inhibe el engrosamiento anormal. La distribución se monitorea mediante un analizador láser de tamaño de partícula o el método de Fisher. El polvo fino mejora la sinterización, mientras que el polvo grueso proporciona resistencia. Las partículas anormales se eliminan mediante tamizado o clasificación por aire. Las varillas superiores de alta densidad requieren un polvo fino uniforme, mientras que las de baja densidad permiten una distribución ligeramente más amplia.

La combinación de purificación y control da como resultado una superficie limpia del polvo de tungsteno, un bajo contenido de oxígeno y carbono, menos inclusiones frágiles y una mayor tenacidad al impacto del mandril. La limpieza química y el lavado con ácido eliminan los residuos, seguidos del secado y el almacenamiento hermético con gas inerte. La purificación y el control del tamaño de partícula del polvo de tungsteno reflejan el perfeccionamiento de la ingeniería de materias primas, y el tamizado de reducción facilita la formación fiable de la estructura del mandril, aportando un valor fundamental a la producción de herramientas para remaches. Gracias a los avances en la tecnología de pruebas, este control se perfecciona continuamente, lo que permite optimizar las propiedades del material.

### 3.1.1.2 Homogeneidad de los elementos de aleación

La uniformidad de los elementos de aleación es un paso crucial en la preparación de materias primas para mandriles de remaches de aleación de tungsteno. Esta uniformidad se logra mediante mezcla mecánica o molienda de bolas para garantizar una distribución aleatoria de los elementos y evitar que la segregación por sinterización afecte la consistencia del rendimiento del mandril. Antes de mezclar, los polvos de aleación, como el níquel, el hierro y el cobre, se someten a un pretratamiento para eliminar la capa de óxido mediante reducción, mejorar químicamente la actividad superficial y promover la adhesión. Se utiliza un mezclador de tipo V o de doble cono a baja velocidad para evitar la separación, y un tiempo de mezcla prolongado garantiza una uniformidad macroscópica.

El molino de bolas refina el polvo mediante la mezcla por impacto de alta energía y la prealeación, lo que induce la difusión mediante fuerzas químicas y mecánicas, lo que resulta en la unión interfacial inicial. Una variante de secado por aspersión atomiza la suspensión en un polvo compuesto esférico, lo que mejora la fluidez y la uniformidad. Tras la mezcla, se toman muestras para análisis químico o

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

microscopía electrónica para verificar la distribución; una baja desviación elemental se considera aceptable. La uniformidad de la mezcla afecta la distribución de la densidad del mandril. La mezcla uniforme asegura una reorganización suave de la sinterización, reduce la fase aglutinante localizada y equilibra la resistencia y la tenacidad del mandril. Los aditivos químicos facilitan la dispersión, y la mezcla se mezcla en húmedo con alcohol, seguido del secado. El control de la uniformidad de la mezcla garantiza la dispersión de la tensión durante el impacto y un desgaste uniforme en la superficie de trabajo. La uniformidad de la mezcla de elementos de aleación en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno refleja la búsqueda de la uniformidad en la ingeniería de dosificación, lo que favorece la consistencia macroscópica de la microestructura mediante interacciones fisicoquímicas y sienta las bases del rendimiento en la fabricación de herramientas. Con los avances en los equipos de mezcla, esta uniformidad continúa mejorando, lo que contribuye a mejoras prácticas en la confiabilidad del mandril.

### 3.1.2 Efecto del proceso de sinterización en la densidad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno

La influencia del proceso de sinterización en la densidad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se refleja principalmente en el control de la temperatura, la atmósfera y el tiempo de retención. Esta influencia determina el grado de transformación del mandril de una pieza porosa a un producto denso, lo que afecta su estabilidad y durabilidad del soporte durante los impactos del remachado. En la etapa inicial de difusión en fase sólida de la sinterización, los cuellos de partículas se unen y la densidad aumenta lentamente. Después de entrar en la etapa de fase líquida, la fase aglutinante se funde y humedece las partículas de tungsteno, y el mecanismo de reorganización hace que las partículas se empaquen firmemente, lo que aumenta significativamente la densidad. Las temperaturas más altas aumentan la cantidad de fase líquida, lo que resulta en un flujo más completo y el llenado de los poros; sin embargo, las temperaturas excesivamente altas conducen al desbordamiento, causando la deformación o segregación de la pieza y una distribución desigual de la densidad.

La selección de la atmósfera afecta la densidad; la reducción con hidrógeno elimina las inclusiones de óxido, mantiene la limpieza de la interfaz y promueve la humectación y la densificación; un entorno de vacío elimina las impurezas volátiles y reduce los residuos de celdas cerradas. Un tiempo de retención prolongado permite una reorganización adecuada y una disolución-reprecipitación, lo que reduce la energía superficial de esferoidización de las partículas de tungsteno y aumenta la densidad de contracción de los poros. Sin embargo, un tiempo de retención excesivo puede provocar el engrosamiento de las partículas y la aparición de nuevos poros. Las velocidades de calentamiento lentas previenen la liquidación local prematura, que puede generar gradientes de densidad. El enfriamiento controlado previene el agrietamiento por tensión térmica, que puede afectar la consistencia de la densidad final.

Los efectos del proceso de sinterización se extienden a las dimensiones del mandril. Cuando la relación longitud-diámetro del tocho en forma de varilla es grande, la densidad final tiende a ser baja, requiriendo accesorios de soporte para ayudar en la uniformidad. Los procesos auxiliares como el prensado isostático en caliente aplican presión después de la sinterización para cerrar los poros, aumentando aún más la densidad. Con un alto contenido de tungsteno, la densidad de sinterización depende más de la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimización de la fase líquida; menos fase aglutinante necesita tiempos de retención más largos. El impacto del proceso de sinterización en la densidad de los mandriles de remache de aleación de tungsteno refleja el principio de densificación de la metalurgia de alta temperatura, apoyando las propiedades volumétricas del mandril a través de la coordinación de parámetros, sentando así las bases mecánicas para las herramientas de remachado. Con los avances en la monitorización de procesos, el control de este efecto se está volviendo más refinado, proporcionando una garantía confiable para la consistencia de la densidad del mandril.

### 3.1.3 Optimización de la tecnología de conformado por prensado en varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno

La optimización de la tecnología de prensado en mandriles para remaches de aleación de tungsteno se centra principalmente en mejorar la distribución de la presión, el diseño de la matriz y la fluidez del polvo. Esta optimización garantiza una densidad uniforme en verde y una forma completa, proporcionando una base de alta calidad para la sinterización posterior. La optimización del prensado isostático en frío aprovecha la transmisión de presión isotrópica del medio líquido, lo que resulta en un pequeño gradiente de densidad en el tocho en forma de varilla. Los parámetros optimizados incluyen una baja tasa de presurización y un mayor tiempo de retención para evitar el agrietamiento causado por el rebote elástico. La selección de un material de matriz flexible se ajusta a la dureza del polvo de tungsteno, lo que reduce el daño por fricción.

La optimización del moldeo emplea presurización bidireccional, una estructura de molde flotante para equilibrar la densidad de las piezas superior e inferior, y un tonelaje de prensa adaptado al volumen de polvo, con una velocidad de prensado gradual para evitar la delaminación. La optimización de la fluidez del polvo incluye la adición de lubricante y, químicamente, el estearato de zinc reduce la fricción entre partículas, lo que resulta en un relleno más denso. La optimización también incluye la prepresurización y el venteo para reducir los gases residuales encerrados. La optimización de la preforma en forma de varilla implica el control de la relación longitud-diámetro y el uso de un mandril de soporte para evitar la flexión.

La optimización de la tecnología de conformado en prensa afecta la consistencia de los expulsores. Las piezas en bruto de alta densidad resultan en una menor contracción por sinterización y una mayor precisión dimensional. El polvo fino de tungsteno optimiza la compactación, mientras que el polvo más grueso requiere mayor presión. Las pruebas optimizadas implican la medición multipunto de la densidad de la pieza en bruto para guiar la iteración de parámetros. La gestión de la pureza química garantiza un bajo nivel de residuos de lubricante, lo que previene la contaminación por sinterización. La optimización de la tecnología de conformado en expulsores de remaches de aleación de tungsteno demuestra la coordinación de la presión en el proceso de conformado, lo que facilita una preparación fiable de la pieza en bruto mediante mejoras en el molde y los parámetros, aportando valor práctico a la producción de herramientas. Con el desarrollo de la precisión de la prensa, esta optimización se está expandiendo, ofreciendo más posibilidades para el conformado de expulsores.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.1.4 El efecto de la sinterización en fase líquida en la densificación de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno

La sinterización en fase líquida en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se logra principalmente mediante los mecanismos de humectación, reorganización y disolución-reprecipitación tras la fusión de la fase aglutinante. Este proceso transforma el mandril del estado poroso de una palanquilla prensada a un producto de alta densidad, mejorando su capacidad de soporte mecánico. Cuando aparece la fase líquida, la fase aglutinante fluye y encapsula las partículas de tungsteno, reduciendo la tensión superficial e impulsando la reorganización de las partículas para rellenar los poros grandes, lo que resulta en un rápido aumento de la densidad. Un ángulo de humectación pequeño promueve la capilaridad y, químicamente, una disminución de la energía interfacial acelera el proceso.

El mecanismo de disolución-reprecipitación se activa durante el período de retención. Las partículas pequeñas de tungsteno se disuelven en la fase líquida, mientras que las partículas más grandes precipitan en su superficie. La esferoidización de las partículas reduce la tensión en las esquinas agudas, y la contracción de los poros densifica aún más la estructura. El mecanismo funciona mejor cuando el volumen de la fase líquida es moderado; un flujo excesivo provoca deformación, mientras que un volumen insuficiente resulta en una reorganización inadecuada. La ventana de temperatura controla la proporción de la fase líquida, y el tiempo de retención permite que el mecanismo se desarrolle por completo. Una atmósfera protectora evita que la oxidación interfiera con la humectación, y la reducción de hidrógeno garantiza una interfaz limpia.

El papel de la sinterización en fase líquida también se refleja en la uniformidad de los mandriles en forma de varilla. Los tochos largos, ayudados por accesorios de soporte, facilitan la distribución de la fase líquida, evitando la baja densidad en los extremos. Cuando el contenido de tungsteno es alto, el efecto depende de la optimización de la fase aglutinante; en sistemas de cobre, la temperatura de la fase líquida es baja y se controla fácilmente. La represurización posterior repone los poros residuales en la fase líquida. El efecto de densificación de la sinterización en fase líquida en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno encarna el principio metalúrgico del flujo a alta temperatura, lo que respalda la estabilidad del volumen del mandril a través de un mecanismo sinérgico, sentando una base duradera para las herramientas de remachado. Con los avances en los equipos de sinterización, el control de este efecto se está volviendo más refinado, proporcionando una ruta confiable para la densificación del mandril.

### 3.2 Tecnología de mecanizado de remaches de aleación de tungsteno

La tecnología de mecanizado para mandriles de remaches de aleación de tungsteno es un componente importante del posprocesamiento pulvimetalúrgico. Esta tecnología transforma las palanquillas sinterizadas en herramientas de precisión con forma de varilla mediante torneado, rectificado, embutición y forjado en caliente, optimizando la precisión dimensional, la calidad superficial y la microestructura. El mecanizado compensa las limitaciones de forma y la rugosidad superficial de las palanquillas sinterizadas. La alta dureza de las aleaciones de tungsteno requiere el uso de herramientas de corte duras y una refrigeración adecuada durante el mecanizado. Esta tecnología incluye el conformado y la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



deformación plástica; el conformado logra una forma refinada, mientras que la deformación plástica refina la microestructura y mejora la resistencia.

La tecnología de mecanizado se centra en la resistencia al desgaste de la herramienta y la adaptación a los parámetros de corte. La fase dura de las partículas de tungsteno facilita el afilado de la herramienta, mientras que la fase de unión garantiza un corte suave. El refrigerante proporciona estabilidad química y protección contra la corrosión, y el corte en seco o una lubricación mínima reduce el daño térmico. La secuencia de mecanizado progresa desde el desbaste hasta el acabado, primero torneando para dar forma y luego rectificando para un acabado suave. El trabajo en caliente se combina con el trabajo en frío, con forjado en caliente para el troquelado inicial, seguido del rectificado en frío para el acabado. El control de defectos se centra en grietas y arañazos superficiales, que se alivian mediante la liberación de tensiones durante el recocido. La tecnología de mecanizado de los mandriles de remache de aleación de tungsteno refleja los desafíos de conformado de las aleaciones refractarias. El herramental de precisión se logra mediante la optimización de herramientas y procesos, proporcionando una base dimensionalmente estable para los soportes de remache. Con la aplicación de equipos CNC, la precisión de esta tecnología también está mejorando, aportando valor práctico a la diversificación de las funciones del mandril.

### 3.2.1 Aplicación de la conformación en mandriles de remaches de aleación de tungsteno

El conformado en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se aplica principalmente mediante torneado, fresado y rectificado. Este proceso moldea la pieza sinterizada en una forma precisa de varilla con caras finales funcionales, lo que garantiza un buen ajuste entre el mandril y la cola del remache y proporciona un soporte estable. El proceso de conformado comienza con la pieza sinterizada, seguida del torneado para eliminar la capa exterior y determinar el diámetro. Se utilizan herramientas de corte de carburo o diamante para resistir la dureza del tungsteno, y la velocidad de corte es moderada para evitar la acumulación de calor. Se utiliza refrigerante químico para la lubricación y la disipación del calor, evitando quemaduras superficiales o microfisuras.

En aplicaciones de conformado, el diseño de la cara final es diverso: las formas de cabeza plana se mecanizan para un acabado liso, mientras que las formas de cabeza cóncava se fresan para adaptarse a la deformación del remache. El rectificado de los lados de la barra mejora la redondez, y la baja rugosidad superficial reduce la fricción. La precisión del conformado se logra mediante tornos CNC, con un estricto control de tolerancia dimensional que facilita el remachado automatizado. El tratamiento térmico posterior al conformado evita la concentración de tensiones, y el recocido suaviza la superficie para mejorar la maquinabilidad.

El conformado también incluye el mecanizado del extremo fijo, como el roscado o ranurado, para facilitar la instalación del equipo. La limpieza química elimina las virutas y el pulido restaura un acabado liso. La aplicación del conformado en mandriles para remaches de aleación de tungsteno demuestra el control dimensional del mecanizado de precisión, logrando un acabado fiable del perfil de la herramienta mediante la optimización de la trayectoria y proporcionando un soporte práctico en las prácticas de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



remachado. Con los avances en los centros de mecanizado, esta aplicación se está expandiendo, ofreciendo más posibilidades de personalización de los mandriles.

### 3.2.2 Aplicación de la deformación plástica en remaches de aleación de tungsteno

La aplicación de la deformación plástica en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se logra principalmente mediante forjado, embutido y laminado. Esta aplicación refina la microestructura sinterizada y mejora la resistencia, la tenacidad y la uniformidad de la densidad del mandril. La deformación plástica comienza con el forjado en caliente, donde la fase aglutinante se ablanda a altas temperaturas para coordinar la deformación de las partículas de tungsteno. El forjado multidireccional uniformiza la tensión, la difusión química promueve la unión de las partículas y la fibrosis microestructural mejora las propiedades axiales.

En aplicaciones de deformación, el trefilado reduce el diámetro, alarga los granos de la varilla y mejora la resistencia a la flexión. El laminado implica múltiples pasadas de reducción, un recocido intermedio libera el endurecimiento y restaura la plasticidad, y el laminado en frío proporciona una superficie lisa. El mecanismo de deformación plástica implica la multiplicación y el reforzamiento de las dislocaciones, mientras que la fase aglutinante absorbe energía para evitar la fractura frágil. La deformación se controla gradualmente, con una gran reducción inicial para el conformado y una reducción menor para el acabado en las etapas posteriores.

La deformación plástica también mejora la porosidad interna y aumenta la densidad de defectos residuales cerrados. La recuperación dinámica de la deformación en caliente es activa, lo que reduce la reorganización y acumulación de dislocaciones. La protección química en atmósfera previene la oxidación y la superficie deformada es fácil de limpiar. La aplicación de la deformación plástica en mandriles de aleación de tungsteno encarna la práctica de ingeniería de la deformación a alta temperatura y baja velocidad, lo que mejora las propiedades mecánicas de la herramienta mediante la optimización de la microestructura y proporciona una base duradera para los impactos del remachado. Con la creciente precisión de los equipos de deformación, esta aplicación se está perfeccionando, contribuyendo a mejoras prácticas en la resistencia del mandril.

### 3.2.3 Optimización de la microestructura de las varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno mediante tratamiento térmico

El tratamiento térmico de los mandriles para remaches de aleación de tungsteno se logra principalmente mediante etapas como el recocido, el tratamiento de solución y el envejecimiento. Esta optimización ajusta el tamaño del grano, la distribución de fases y el estado de los defectos, mejorando el equilibrio entre resistencia, tenacidad y resistencia a la fatiga del mandril. El tratamiento térmico se realiza antes y después del mecanizado. Tras la sinterización, el recocido libera la tensión residual, y la difusión química impulsa la migración y aniquilación de dislocaciones, reduciendo la tensión interna en el mandril y previniendo la propagación de microfisuras durante el uso. La protección mediante atmósfera de vacío o

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hidrógeno previene la oxidación, y la temperatura se controla dentro del rango de recristalización de la fase aglutinante. Durante el período de mantenimiento, la migración del límite de grano refina los granos.

El proceso de optimización también incluye un tratamiento de solución, donde la disolución a alta temperatura de los elementos de aleación forma una solución sólida sobresaturada, seguida de un enfriamiento rápido para fijar el estado. La fase aglutinante refuerza y mejora la dureza del mandril. El tratamiento de envejecimiento precipita las fases finas, fijando las dislocaciones y evitando el deslizamiento, mejorando así la tenacidad al impacto del mandril. El tratamiento térmico optimiza la unión de la interfaz, y la difusión de los elementos forma una zona de gradiente, mejorando la resistencia al desgaste de la superficie de trabajo del mandril. Durante la optimización, se logra una mayor esferoidización de las partículas de tungsteno, lo que reduce la energía superficial y minimiza la tensión en las esquinas afiladas.

El tratamiento térmico optimiza la microestructura, lo que impacta significativamente el rendimiento general del mandril. Los granos refinados resultan en alta resistencia sin sacrificar la tenacidad y una deformación coordinada durante el remachado repetido. Los parámetros de optimización se ajustan según el sistema de aleación; las temperaturas más altas promueven la recuperación en aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, mientras que las aleaciones de tungsteno-níquel-cobre ofrecen mejor conductividad térmica y disipación de calor más rápida. La gestión de la pureza química minimiza las impurezas y previene la precipitación de fases anormales. La microestructura del mandril optimizada por el tratamiento térmico refleja el control del material sobre la difusión térmica, lo que respalda la estabilidad del rendimiento de la herramienta a través del tratamiento cíclico y proporciona una base confiable para los soportes de remachado. Con los avances en la tecnología de control de hornos, esta optimización se está refinando cada vez más, lo que aporta valor práctico a la durabilidad del mandril.

#### **3.2.4 Aplicación de la tecnología de rectificado de precisión en el mecanizado de superficies de remachadores de aleación de tungsteno**

Mecanizado de mandriles de remaches de aleación de tungsteno, principalmente para lograr un alto acabado superficial y dimensiones precisas. Esta aplicación implica la eliminación gradual de material mediante una muela o banda de rectificado para lograr una superficie de trabajo lisa y controlar la redondez del mandril. El proceso de rectificado se divide en rectificado basto y rectificado fino. El rectificado basto elimina las sobras de mecanizado y los defectos superficiales, mientras que el rectificado fino mejora el acabado superficial. Químicamente, las muelas de diamante o carburo de boro resisten la dureza del tungsteno, y la lubricación con refrigerante disipa el calor y previene el daño térmico.

En diversas aplicaciones, el rectificado a espejo de la superficie de trabajo del expulsor reduce la adherencia del remache, lo que resulta en un bajo coeficiente de fricción y un conformado uniforme. El rectificado centrado o sin centro de la parte cilíndrica exterior del expulsor garantiza un soporte estable y una alta redondez. El estricto control del paralelismo durante el rectificado de la cara frontal garantiza un buen ajuste entre el expulsor y el remache. Los procesos de rectificado de precisión se adaptan a la

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

relación longitud-diámetro del expulsor en forma de varilla , y el método de sujeción evita la vibración por flexión. El rectificado frecuente de la muela mantiene el filo, y los parámetros de rectificado (velocidad y presión) se adaptan a las características de las aleaciones de tungsteno.

Las aplicaciones de rectificado de precisión también incluyen formas especiales, superficies cóncavas o ranuras obtenidas mediante muelas de conformado. El expulsor se adapta mejor a la deformación del remache. La limpieza química elimina los residuos del rectificado y el pulido ayuda a restaurar el brillo. El proceso de rectificado de precisión de los expulsores de aleación de tungsteno representa el refinamiento de la ingeniería de superficies, garantizando superficies de herramientas de alta calidad mediante una extracción gradual y aportando mejoras prácticas al remachado. Con el desarrollo de las rectificadoras CNC, la precisión de esta aplicación también está mejorando, ofreciendo más posibilidades para las funciones superficiales de los expulsores.

### **3.2.5 Realización de formas complejas para varillas de remache de aleación de tungsteno mediante mecanizado por descarga eléctrica**

El mecanizado por electroerosión (EDM) se utiliza para lograr formas complejas en mandriles de remaches de aleación de tungsteno, principalmente mediante la eliminación de material mediante descarga eléctrica. Esta aplicación es adecuada para el conformado preciso de ranuras, formas irregulares o características internas en la cara final del mandril, superando las limitaciones del mecanizado tradicional. La EDM utiliza una descarga pulsada entre el electrodo de la herramienta y el mandril; la chispa calentada químicamente funde y vaporiza el material localizado, y el medio arrastra el material eliminado. Las aleaciones de tungsteno tienen una buena conductividad eléctrica, lo que resulta en una descarga estable, y el proceso de mecanizado evita la deformación al no utilizar fuerza mecánica.

El electrodo de la herramienta de proceso se moldea en forma negativa con cobre o grafito. El expulsor se fija en el fluido de trabajo y la velocidad de grabado se controla mediante el parámetro de corriente de ancho de pulso. Las formas complejas, como superficies cóncavas multinivel u orificios laterales, se moldean mediante corte de hilo CNC mediante la programación de la trayectoria del electrodo. El expulsor se enfría y se descascara con queroseno o agua desionizada como medio químico para evitar una zona excesivamente afectada por el calor. La rugosidad superficial se ajusta mediante descarga de precisión y se restaura mediante pulido tras el acabado superficial.

Las ventajas del mecanizado por electroerosión (EDM) residen en su naturaleza sin contacto. Para aleaciones de tungsteno de alta dureza, los métodos de corte tradicionales resultan difíciles, mientras que la EDM elimina el material de forma uniforme. Se logran fácilmente pequeñas características del mandril, como microconcavidades o texturas, lo que mejora la contención del remache. La limpieza química elimina la capa blanca y el tratamiento térmico libera la tensión residual. La EDM de mandriles de aleación de tungsteno permite el conformado flexible de formas complejas, admite diversos diseños de herramientas mediante el mecanismo de descarga y proporciona soporte personalizado en aplicaciones especializadas de remachado.

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

### 3.1 Caracterización y control de calidad de varillas remachables de aleación de tungsteno

Los mandriles para remaches de aleación de tungsteno son cruciales en el proceso de fabricación. Este control implica verificar la consistencia de la microestructura, la composición y las propiedades del material mediante análisis microscópico, métodos espectroscópicos y ensayos físicos, lo que garantiza el rendimiento fiable del mandril en el soporte de remaches. La caracterización se centra en la microestructura y la distribución elemental, mientras que el control de calidad abarca la uniformidad de la densidad, la distribución de la dureza y los defectos superficiales. La observación microscópica de la esferoidización de partículas y las interfaces de fase, la identificación espectroscópica de la pureza de los componentes y los ensayos físicos evalúan las propiedades mecánicas.

El control se implementa durante toda la producción, desde la materia prima en polvo hasta los mandriles terminados, con muestreos y pruebas en múltiples puntos para evitar desviaciones de lote. Se realizan análisis químicos para limitar las impurezas, controles de porosidad microscópica y pruebas mecánicas de tenacidad al impacto. Los datos de caracterización se utilizan para obtener información sobre los ajustes del proceso, y los parámetros de sinterización se optimizan para reducir los defectos. Las normas de control de calidad se basan en las especificaciones de la industria, y los rangos de densidad y dureza de los mandriles se ajustan a los requisitos de la aplicación. Se realizan operaciones de laboratorio limpias para evitar que la contaminación interfiera en los resultados.

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno incorporan el sistema de inspección de circuito cerrado de la ingeniería de materiales y respaldan la estabilidad del rendimiento de la herramienta a través de la colaboración de múltiples métodos, lo que proporciona una garantía confiable en la práctica del remachado.

#### 3.3.1 Aplicación del análisis microscópico en varillas de remaches de aleación de tungsteno

El análisis microscópico de mandriles de remaches de aleación de tungsteno se realiza principalmente mediante microscopios ópticos, microscopios electrónicos de barrido (MEB) y microscopios electrónicos de transmisión (MET). Esto permite observar las características microestructurales, la distribución de partículas y la morfología de los defectos, lo que orienta la optimización del proceso y la evaluación de la calidad. Los microscopios ópticos se utilizan para la observación metalográfica preliminar; tras pulir y grabar la sección transversal de la muestra, se contrastan claramente las partículas de tungsteno y la fase aglutinante, lo que permite evaluar la esferoidización y la uniformidad de la distribución de fases. El grabado químico disuelve selectivamente la fase aglutinante, resaltando el contorno de la estructura de tungsteno.

La microscopía electrónica de barrido (MEB) proporciona imágenes de mayor resolución y retrodispersión, revelando un alto brillo en la fase de tungsteno, una fase aglutinante más oscura y una clara visibilidad del espaciamiento de partículas y las interfaces en la sección transversal de la varilla superior. La espectroscopia de energía dispersiva (EDS) facilita el mapeo elemental, revelando segregación localizada o impurezas. La observación mediante microscopía electrónica de transmisión

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(MET) de muestras de secciones delgadas revela dislocaciones, límites de grano y fases precipitadas tras el adelgazamiento iónico, lo que permite analizar el mecanismo de daño por impacto de la varilla superior.

El análisis microscópico se aplica en el control de producción. Tras la sinterización, se inspeccionan las muestras para detectar porosidad residual; tras el trabajo en caliente, se observa la textura de la fibra; y tras el desgaste superficial, se evalúa la capa dañada. Los resultados analíticos guían las temperaturas de recocido, el refinamiento de los granos y la mejora de la tenacidad. El análisis de la sección longitudinal del mandril garantiza la uniformidad axial, y las caras frontales se utilizan para inspeccionar defectos en la superficie de trabajo. La preparación química y la corrosión se aplican adecuadamente para evitar una disolución excesiva que enmascare las características clave. El uso del análisis microscópico en mandriles de remaches de aleación de tungsteno demuestra la herramienta de la ciencia de los materiales de la caracterización microscópica. A través de la observación multiescala, facilita la comprensión de las propiedades microestructurales, desempeña un papel clave en el control de calidad y proporciona evidencia visual para mejorar la durabilidad del mandril.

### **3.3.2 Identificación de la composición de mandriles de remaches de aleación de tungsteno mediante métodos espectroscópicos**

Los métodos espectroscópicos para identificar la composición de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno emplean principalmente fluorescencia de rayos X, emisión óptica y espectroscopia de absorción atómica. Estos métodos proporcionan información sobre el contenido y la distribución de elementos, garantizando que la composición del mandril cumpla con los requisitos de diseño y evitando que las impurezas afecten su rendimiento. La espectroscopia de fluorescencia de rayos X proporciona un análisis no destructivo de la composición superficial; la intensidad de la excitación de fluorescencia característica refleja la proporción de tungsteno, níquel, hierro o cobre. El escaneo multipunto del cuerpo del mandril evalúa la uniformidad.

La espectroscopia de fotoemisión implica la disolución de la muestra, seguida de la excitación con plasma, y el uso de líneas espectrales para identificar el tipo y el contenido de elementos, lo que permite detectar trazas de impurezas como el oxígeno y el carbono. La espectroscopia de absorción atómica utiliza la luz característica absorbida por la solución nebulizada para determinar con precisión los elementos auxiliares de bajo contenido. La aplicación de los métodos espectroscópicos es evidente en la aceptación de materias primas y la inspección de productos terminados, incluyendo la identificación de la pureza de lotes de polvo y el análisis de la segregación en la sección transversal de la varilla superior.

La preparación de la muestra es crucial en el proceso de identificación; la limpieza de la superficie evita la contaminación y el ácido disolvente presenta una alta selectividad. Los métodos espectroscópicos para identificar la composición de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno facilitan la trazabilidad de la calidad, lo que permite ajustar la proporción de la mezcla cuando se producen desviaciones. Las muestras químicas estándar calibran el instrumento y las mediciones repetidas garantizan la consistencia. Los resultados de la identificación guían el tratamiento térmico, ya que la distribución de elementos influye en el comportamiento de la precipitación. El uso integral de métodos espectroscópicos abarca

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



desde la escala macroscópica hasta la microscópica, lo que permite un rápido cribado de fluorescencia y una cuantificación precisa de las emisiones. La composición del mandril se mantiene estable durante las aplicaciones de remachado, y la identificación espectroscópica proporciona evidencia a largo plazo. La identificación de la composición de mandriles de remaches de aleación de tungsteno mediante métodos espectroscópicos demuestra el respaldo material de la química analítica, optimiza el control de la producción mediante información elemental y aporta datos fiables a la calidad de las herramientas.

### **3.3.3 La importancia de las pruebas de densidad en la evaluación de la calidad de las varillas maestras de remaches de aleación de tungsteno**

La prueba de densidad en la evaluación de la calidad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se basa principalmente en su función como indicador directo de la densificación general y la uniformidad de la microestructura. Esta prueba ayuda a determinar si las propiedades volumétricas del mandril, tras la sinterización y el procesamiento, cumplen los requisitos de soporte. La densidad refleja el grado de llenado de las partículas de tungsteno con la fase aglutinante. Los mandriles de alta densidad presentan menos poros, fuerzas de reacción inerciales más intensas, transferencia de energía concentrada durante los impactos del remachado y una deformación uniforme del remache. Los mandriles de baja densidad pueden presentar porosidad residual, una distribución desigual de la resistencia y son propensos a hendiduras localizadas o daños por fatiga durante el uso. Las pruebas de densidad suelen utilizar el método de Arquímedes o el método de desplazamiento de gas, con múltiples puntos de muestreo para evaluar la uniformidad de la varilla. Una pequeña diferencia de densidad entre los extremos y el centro indica una reorganización de sinterización suficiente. Químicamente, la densidad está relacionada con la proporción de la composición; un mayor contenido de tungsteno resulta en una mayor densidad teórica. Las desviaciones de la prueba revelan segregación o impurezas. Las pruebas de densidad guían los ajustes del proceso; si la sinterización es insuficiente, extender el tiempo de mantenimiento o realizar un prensado isostático con calor adicional puede mejorar las propiedades mecánicas de la varilla superior.

Las pruebas también evaluaron los efectos del tratamiento térmico; un ligero cambio en la densidad tras el recocido reflejó la liberación de tensiones, y las dimensiones del mandril se mantuvieron estables. Las pruebas de densidad tras el acabado superficial verificaron la ausencia de pérdida de material y la consistencia de la calidad del mandril. La importancia de las pruebas de densidad en la evaluación de la calidad de los mandriles para remaches de aleación de tungsteno reside en su exhaustivo reflejo de las propiedades volumétricas. Las comparaciones numéricas facilitan la selección fiable de herramientas y proporcionan una base de calidad para la práctica del remachado. Un control estable de la densidad sienta las bases para la producción en masa de mandriles, garantizando un rendimiento de soporte equilibrado para cada herramienta.

### **3.3.4 Tecnología de prueba para detectar defectos internos en barras superiores de remaches de aleación de tungsteno**

Las técnicas de ensayos no destructivos (END) para detectar defectos internos en mandriles de remaches de aleación de tungsteno emplean principalmente métodos ultrasónicos, de rayos X y de corrientes de

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

Foucault. Estos métodos revelan porosidad, grietas o inclusiones sin dañar el mandril, lo que facilita el control de calidad y previene posibles fallos. Los ensayos ultrasónicos utilizan la reflexión de ondas sonoras para localizar discontinuidades internas; el escaneo longitudinal del mandril en forma de varilla detecta defectos axiales; y, químicamente, la intensidad de las reflexiones interfaciales distingue entre porosidad y grietas. Las imágenes por transmisión de rayos X revelan diferencias de densidad, mostrando claramente áreas de baja densidad dentro del mandril, lo que las hace adecuadas para el cribado por lotes.

Las pruebas por corrientes de Foucault detectan defectos superficiales o cercanos a la superficie. La sonda presenta buena conductividad y las perturbaciones por corrientes de Foucault revelan microfisuras o segregación. El proceso de prueba garantiza la limpieza de la muestra, una cobertura completa de la trayectoria de la sonda y un escaneo multiángulo para mejorar la cobertura. Combina técnicas de pruebas no destructivas, como pruebas ultrasónicas profundas, distribución general de rayos X y sensibilidad superficial a las corrientes de Foucault.

Los resultados de las pruebas guían el retrabajo; los mandriles defectuosos se reparan o eliminan mediante prensado isostático en caliente; y la tenacidad al impacto es fiable tras la limpieza del interior del mandril. La alta pureza química reduce las señales falsas y mejora la sensibilidad de la detección de defectos. La tecnología de ensayos no destructivos para detectar defectos internos en mandriles de remaches de aleación de tungsteno demuestra la seguridad del material que ofrece la inspección no destructiva. El uso colaborativo de múltiples métodos refuerza la calidad interna de la herramienta y sienta las bases para el control de defectos en los soportes de remachado. La acumulación de datos de detección de defectos sienta las bases para los ciclos de retroalimentación del proceso, garantizando el rendimiento seguro de los lotes de mandriles.

### 3.4 Métodos innovadores para la preparación de varillas con remaches de aleación de tungsteno

Los métodos innovadores para la fabricación de mandriles para remaches de aleación de tungsteno se centran principalmente en la expansión de la pulvimetalurgia tradicional y la introducción de tecnologías de conformado emergentes. Esta innovación ayuda a superar las limitaciones de los procesos convencionales en la gestión de formas complejas, pequeñas dimensiones y la personalización de lotes, mejorando la flexibilidad de producción y el aprovechamiento del material. Entre los métodos innovadores se incluyen el moldeo por inyección y la fabricación aditiva, que amplían el margen de diseño de los mandriles, manteniendo las ventajas de densidad y dureza de las aleaciones de tungsteno. El moldeo por inyección logra un conformado casi final mediante el flujo de alimentación, mientras que la fabricación aditiva permite la estratificación y la construcción de geometrías arbitrarias.

La fuerza impulsora de este enfoque innovador reside en las diversas necesidades de las herramientas de remachado. El prensado y la sinterización tradicionales son adecuados para piezas con forma de varilla estándar, mientras que el nuevo método se adapta a mandriles de forma irregular o miniatura. Químicamente, la innovación conserva la estructura bifásica, con partículas de tungsteno que proporcionan una estructura de soporte y una fase aglutinante de coordinación. La innovación del proceso también prioriza la protección del medio ambiente, reduciendo los residuos y el consumo energético. El

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

innovador método para preparar mandriles de remache de aleación de tungsteno refleja las tendencias modernas en el conformado de materiales, impulsando el desarrollo personalizado de herramientas mediante la integración tecnológica y ofreciendo más opciones en el ámbito del ensamblaje.

### **3.4.1 Potencial del moldeo por inyección en la producción de mandriles para remaches de aleación de tungsteno**

El moldeo por inyección en la producción de mandriles para remaches de aleación de tungsteno se basa principalmente en su capacidad para lograr formas complejas y un conformado casi final. Este método consiste en mezclar polvo de aleación de tungsteno con un aglutinante orgánico para formar una materia prima, que posteriormente se inyecta a alta presión en un molde para formar un cuerpo verde, seguido del desaglomerado y la sinterización para obtener el producto terminado. Durante la preparación de la materia prima, se logra una alta carga de polvo, y los aglutinantes, como los de cera o los poliméricos, proporcionan fluidez y resistencia. Químicamente, el aglutinante encapsula las partículas para evitar su separación. Los parámetros de inyección, como la temperatura y la presión, se adaptan a la viscosidad de la materia prima, y el molde está diseñado con precisión con ranuras en los extremos o agujeros laterales, lo que permite un moldeo en un solo paso y reduce el procesamiento posterior.

El potencial reside en la forma personalizable de los expulsores. Las superficies cóncavas multinivel o las características internas difíciles de moldear con el prensado tradicional se pueden lograr fácilmente mediante moldeo por inyección. Los expulsores se adaptan mejor a la deformación de remaches especiales. Los expulsores de pared delgada o esbelta presentan un espesor uniforme y una alta consistencia de densidad. El moldeo por inyección permite la personalización de lotes pequeños, los cambios de molde son rápidos y las especificaciones de los expulsores son flexibles para adaptarse a diferentes equipos de remachado. El proceso de desaglomerado utiliza la eliminación combinada solvotérmica de aglutinantes, y la contracción es controlable después de la sinterización, lo que resulta en una buena precisión dimensional. El potencial de producción de este método también se refleja en una mayor eficiencia. Las máquinas de moldeo por inyección automatizadas operan de forma continua con ciclos cortos, lo que las hace idóneas para la producción de volumen medio. Presenta una buena estabilidad química y bajos residuos de aditivos en la materia prima, lo que no afecta al rendimiento del expulsor. El potencial del moldeo por inyección en la producción de expulsores de remaches de aleación de tungsteno abre nuevas vías para el diseño de herramientas, facilitando la realización de funciones complejas mediante el conformado por flujo y demostrando aplicaciones prometedoras en el remachado de precisión. El desarrollo de este método también ha impulsado la optimización de las formulaciones de la materia prima, mejorando aún más la uniformidad de la microestructura del expulsor.

### **3.4.2 La influencia de la tecnología de fabricación aditiva en la personalización de varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno**

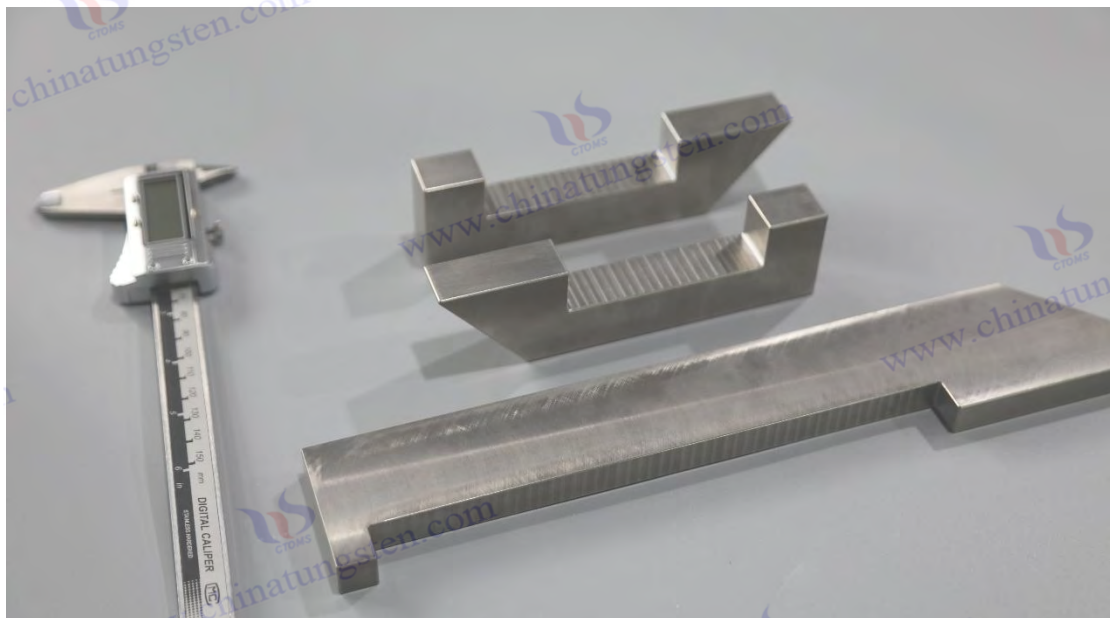
La tecnología de fabricación aditiva para la personalización de mandriles de remaches de aleación de tungsteno se basa principalmente en la obtención de geometrías y estructuras internas arbitrarias mediante la construcción en capas. Técnicas como la fusión selectiva por láser (SLM) o la pulverización

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

de aglutinante solidifican selectivamente el polvo de aleación de tungsteno capa a capa para formar mandriles sin necesidad de moldes. En la fusión de lechos de polvo, la fusión láser de partículas produce químicamente una humectación localizada en fase líquida a alta temperatura, similar a la sinterización, lo que genera una fuerte unión metalúrgica entre capas. La pulverización de aglutinante, seguida de la sinterización y el desaglomerado, es adecuada para mandriles huecos o de gradiente complejos.

El impacto reside en la gran libertad de personalización, que permite la construcción directa de microtexturas en la cara final del expulsor o en los canales de refrigeración internos, así como un remachado optimizado para la disipación del calor o la reducción de vibraciones. Los expulsores multifuncionales, difíciles de fabricar con procesos tradicionales, se pueden iterar rápidamente mediante modelos digitales, lo que resulta en ciclos de diseño más cortos. La fabricación aditiva facilita la personalización de lotes pequeños, con especificaciones del expulsor ajustadas con precisión al equipo, eliminando así los moldes de desecho.

El impacto tecnológico también se refleja en el aprovechamiento del material, con altas tasas de recuperación de polvo y mandriles con forma casi neta que reducen el mecanizado. Químicamente, la difusión entre capas es uniforme, lo que resulta en una microestructura densa del mandril con propiedades similares a las de los mandriles convencionales. El diseño de composición en gradiente es posible, lo que resulta en una alta dureza superficial y una buena tenacidad del núcleo en el mandril. La influencia de la tecnología de fabricación aditiva en la personalización de los mandriles para remaches de aleación de tungsteno ha supuesto una revolución en el diseño de la producción de herramientas, impulsando la innovación funcional integrada mediante la estratificación y proporcionando soluciones flexibles para aplicaciones especializadas de remachado.



CTIA GROUP LTD Varilla superior con remache de aleación de tungsteno

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## CTIA GROUP LTD

### 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/cm<sup>3</sup>), 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

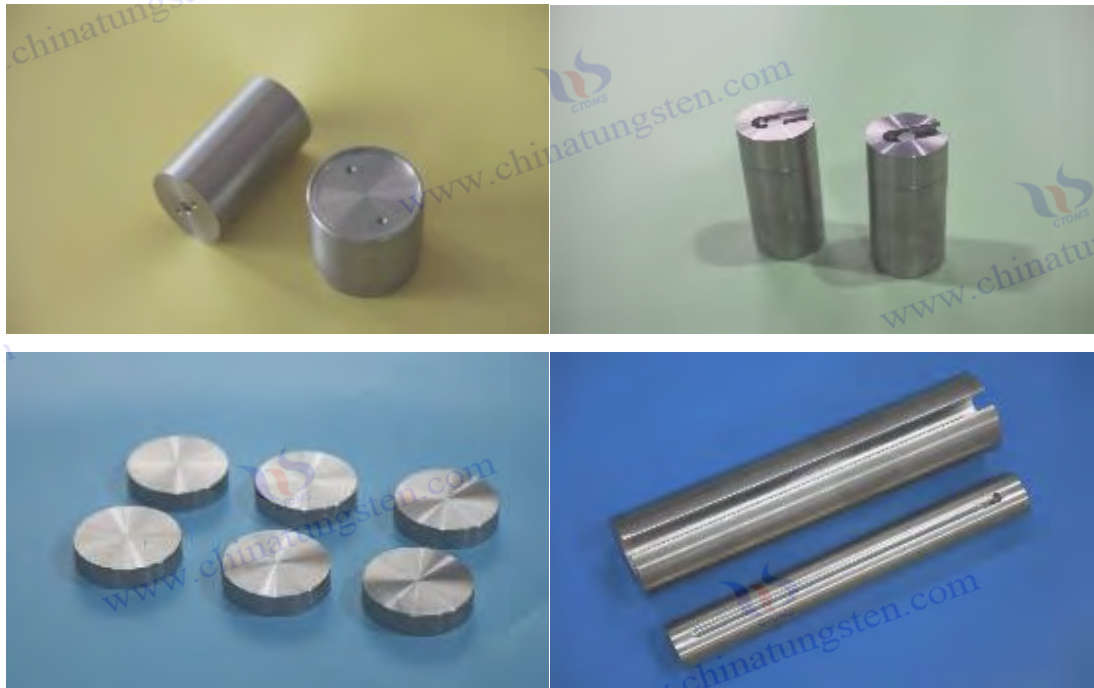
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Capítulo 4 Propiedades físicas de las varillas de remache de aleación de tungsteno

### 4.1 Densidad y propiedades térmicas de las varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno

La densidad y las propiedades térmicas de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno son componentes esenciales de su rendimiento físico, afectando directamente su fuerza de reacción inercial, la transferencia de energía y la adaptabilidad térmica durante el remachado. La alta densidad concentra la masa del mandril, proporcionando un soporte estable durante el impacto. Las propiedades térmicas, como la expansión y la conducción térmicas, determinan la retención dimensional y el rendimiento del mandril bajo calentamiento localizado o cambios de temperatura ambiente. La estructura bifásica de las aleaciones de tungsteno confiere estas propiedades: la fase de tungsteno proporciona la base de alta densidad, mientras que la fase aglutinante regula la adaptación a la expansión térmica.

El diseño equilibrado de densidad y propiedades térmicas permite que el mandril se adapte a diferentes condiciones de remachado. Los tipos de alta densidad presentan alta inercia y son adecuados para cargas pesadas, mientras que los tipos con buena conductividad térmica disipan el calor rápidamente, reduciendo el aumento de temperatura. Las pruebas de características guían la selección del material; una densidad uniforme garantiza una fuerza de reacción constante, y una baja expansión térmica mantiene la precisión de ajuste. La densidad y las propiedades térmicas de [los mandriles de remache de aleación de tungsteno](#) reflejan la aplicación de las propiedades físicas del material en la ingeniería. La optimización de las características garantiza el rendimiento estable de la herramienta durante el ensamblaje y proporciona una base sólida para la práctica del remachado.

#### 4.1.1 Principio de medición de densidad en mandriles de remaches de aleación de tungsteno

El principio de medición de la densidad en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se basa principalmente en el desplazamiento volumétrico y el cálculo de la masa. Este principio ayuda a evaluar la densidad y la uniformidad de la microestructura del mandril, determinando así su comportamiento inercial en el soporte del remache. El método de Arquímedes, comúnmente utilizado, consiste en sumergir el mandril en un líquido, calcular el volumen mediante la diferencia de flotabilidad y obtener la densidad a partir de la masa. Químicamente, se selecciona un líquido no reactivo con la aleación para evitar que la disolución superficial afecte la precisión. Las mediciones multipunto del mandril en forma de varilla evalúan la uniformidad axial; una densidad constante en los extremos y el centro indica una reorganización de sinterización suficiente.

El principio de medición también incluye variantes de desplazamiento de gas, donde los cambios de presión en un recipiente lleno de gas inerte reflejan el volumen, lo cual es adecuado para mandriles sensibles a la superficie. La clave del principio reside en la adquisición precisa del volumen; para mandriles con formas regulares, se utiliza el cálculo geométrico directo, mientras que para formas irregulares, el método de desplazamiento es más adecuado. Se utiliza una balanza de precisión para la medición de masa y la temperatura ambiente para corregir la densidad del líquido. La aplicación de los

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

principios de medición de densidad revela efectos en el proceso: una sinterización insuficiente produce una baja densidad, mientras que el prensado isostático en caliente la aumenta.

La medición es crucial para el control de calidad de los mandriles. Una alta densidad produce una fuerte fuerza de reacción inercial y una deformación uniforme del remache. La pureza afecta la medición; las impurezas y la porosidad reducen las lecturas. La medición segmentada de la longitud del mandril evita errores. El principio de medición de la densidad en mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una base cuantitativa para las propiedades volumétricas, facilita la evaluación de la inercia de la herramienta mediante cálculos de sustitución y proporciona una referencia práctica en la práctica del remachado.

#### **4.1.2 Contribución del coeficiente de expansión térmica a la estabilidad del mandril del remache de aleación de tungsteno**

El coeficiente de expansión térmica que influye en la estabilidad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se refleja principalmente en su capacidad para mantener su tamaño y forma bajo cambios de temperatura. Esto garantiza que el mandril se ajuste perfectamente a la cola del remache cuando se produce un calentamiento por fricción local o cuando cambia la temperatura ambiente, evitando holguras o sobrepresiones. Las aleaciones de tungsteno tienen un bajo coeficiente de expansión térmica; la fase de tungsteno predomina con pequeños cambios de volumen, y la fase aglutinante ajusta el coeficiente general, lo que resulta en un aumento limitado de la longitud del mandril durante el calentamiento y un buen mantenimiento de la planitud de la superficie de trabajo.

interacción bifásica : las partículas de tungsteno limitan la expansión de la fase aglutinante, amortiguando químicamente la deformación térmica causada por la tensión interfacial, y el mandril vuelve a su posición original tras el ciclo térmico. El bajo coeficiente de expansión térmica reduce el agrietamiento por tensión térmica, y el mandril presenta una gran estabilidad con el uso repetido. Durante el calentamiento del remachado, el mandril se expande mínimamente, lo que garantiza un posicionamiento preciso del remache y una conexión estable. La contribución del coeficiente de expansión térmica también afecta la compatibilidad del equipo; una buena adaptación térmica entre el mandril y la remachadora garantiza un ensamblaje seguro. Los ajustes de composición optimizan esta contribución, y el dopaje con molibdeno reduce aún más el coeficiente. El tratamiento térmico homogeneiza la microestructura, lo que resulta en una contribución más equilibrada. La contribución del coeficiente de expansión térmica a la estabilidad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno refleja el soporte material de las propiedades termofísicas. El diseño de baja expansión optimiza la adaptabilidad térmica de la herramienta, sentando las bases para la fiabilidad dimensional en entornos de remachado.

##### **4.1.2.1 Comportamiento térmico de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno en condiciones de alta temperatura**

El uso de mandriles de remaches de aleación de tungsteno en condiciones de alta temperatura se manifiesta principalmente en cambios dimensionales, evolución de la microestructura y tendencia a la

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

oxidación superficial. Este comportamiento es evidente en condiciones de calentamiento por fricción localizada o remachado en caliente, lo que afecta la retención de la forma y la precisión del soporte del mandril. El alto punto de fusión de la fase de tungsteno resulta en una temperatura de ablandamiento general relativamente alta para el mandril. La fase aglutinante fluye y coordina las partículas de tungsteno a altas temperaturas. La expansión térmica genera microesfuerzos, pero la unión interfacial amortigua estos esfuerzos, evitando una deformación significativa. A medida que la superficie de trabajo del mandril se calienta, la energía superficial aumenta, las partículas de tungsteno se vuelven ligeramente más gruesas y la difusión de la fase aglutinante promueve la uniformidad interfacial.

El comportamiento térmico también incluye la respuesta a la fatiga térmica, la migración del límite de grano durante el calentamiento y enfriamiento repetidos, un ligero crecimiento del grano en el mandril (controlable mediante tratamiento térmico), la difusión química a altas temperaturas, la formación de una fina capa de óxido en la superficie del mandril, la reacción preferente de la fase aglutinante, pero con protección general por la fase de tungsteno, la conductividad térmica que favorece la disipación del calor a altas temperaturas, un gradiente de temperatura suave en el mandril y una distribución uniforme de la tensión térmica. El comportamiento térmico del mandril a alta temperatura es adecuado para el remachado en caliente, y la fuerza de reacción del mandril es estable durante la formación del remache.

El comportamiento térmico incluye la relación de composición; un mayor contenido de tungsteno resulta en una mayor estabilidad térmica, mientras que una mayor concentración de cobre acelera la disipación del calor. El tratamiento térmico preoptimiza la microestructura, el recocido a alta temperatura libera tensiones y el mandril se recupera bien tras el ciclo térmico. Los recubrimientos superficiales o la pasivación proporcionan protección adicional a altas temperaturas, reduciendo las pérdidas por oxidación. El comportamiento térmico de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno en condiciones de alta temperatura demuestra la adaptabilidad térmica de los compuestos refractarios, manteniendo las dimensiones y el rendimiento de la herramienta mediante la sinergia entre fases, lo que aporta valor práctico en el ensamblaje en caliente.

#### **4.1.2.2 Respuesta de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno en entornos de baja temperatura**

Los mandriles de remaches de aleación de tungsteno en entornos de baja temperatura presentan principalmente una tendencia a la transición frágil y una contracción dimensional. Esta respuesta se manifiesta en el remachado en frío o el ensamblaje a baja temperatura, lo que afecta la tenacidad al impacto y la precisión de ajuste del mandril. La estructura cúbica centrada en el cuerpo de la fase de tungsteno presenta menos sistemas de deslizamiento a bajas temperaturas, mientras que la ductilidad cúbica centrada en la cara de la fase aglutinante ayuda a coordinar el proceso. La temperatura general de transición frágil del mandril es relativamente baja, lo que evita la fractura repentina. Durante la contracción a baja temperatura, el bajo coeficiente de expansión térmica del tungsteno produce pequeños cambios dimensionales en el mandril, lo que resulta en una buena adaptación al remache.

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

La respuesta también incluye liberación de la tensión térmica, relajación de la tensión residual a bajas temperaturas y una mayor tendencia a la cicatrización de microfisuras dentro del mandril. Químicamente, la actividad del oxígeno a baja temperatura produce una oxidación lenta de la superficie del mandril, manteniendo un acabado liso. La absorción de la energía de impacto a bajas temperaturas se logra mediante la deformación de la fase aglutinante, lo que resulta en una fuerza de reacción constante del mandril y una formación uniforme del remache. La respuesta del mandril en entornos de baja temperatura es adecuada para el remachado en frío, garantizando una carga estable del equipo a bajas temperaturas de operación.

Los factores que influyen en la respuesta incluyen ajustes de composición: un mayor contenido de níquel mejora la tenacidad a baja temperatura, mientras que la adición de hierro regula la temperatura de transformación. El tratamiento térmico de envejecimiento a baja temperatura refuerza los precipitados y mejora la resistencia a la fragilidad del mandril. El tratamiento superficial previene la corrosión por condensación, garantizando así la estabilidad del mandril durante el almacenamiento a baja temperatura. La respuesta de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno en entornos de baja temperatura demuestra la amplia adaptabilidad térmica de los materiales compuestos, manteniendo el rendimiento mecánico de la herramienta mediante la coordinación estructural y proporcionando un soporte fiable en el ensamblaje en frío.

#### **4.1.3 Aplicación de la calorimetría diferencial de barrido en varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno**

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) se utiliza principalmente en mandriles de remaches de aleación de tungsteno para analizar el comportamiento de transformación térmica y las características de transformación de fase del material. Este método revela los procesos endotérmicos o exotérmicos del mandril bajo cambios de temperatura mediante la comparación de la diferencia de flujo térmico entre la muestra y una referencia, lo que ayuda a optimizar los procesos de tratamiento térmico y a evaluar la estabilidad a alta temperatura. Durante la prueba, se coloca una pequeña muestra de mandril en el crisol del instrumento y se calienta o enfría simultáneamente con una referencia inerte. Se registra la curva de flujo térmico y las transformaciones de fase química, como la fusión o la precipitación de la fase aglutinante, se representan mediante cambios de pico en la curva.

En la práctica, la calorimetría diferencial de barrido (DSC) se utiliza para identificar la temperatura de recristalización del mandril, lo que guía los parámetros de recocido y previene temperaturas excesivamente altas que podrían provocar el engrosamiento del grano. La temperatura de tratamiento de la solución se determina a partir del pico endotérmico de la curva, lo que demuestra claramente el comportamiento de disolución de los elementos de aleación en el mandril. El análisis del pico exotérmico de la precipitación por envejecimiento indica la formación de fases de refuerzo, lo que valida el mecanismo de mejora de la resistencia del mandril. La evaluación de la estabilidad a alta temperatura se realiza observando el flujo de calor cerca del punto de fusión, lo que predice la tendencia al ablandamiento del mandril en condiciones de remachado en caliente.

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

El método también se utiliza para estudiar los efectos de las impurezas; el oxígeno o el carbono residuales inducen picos adicionales, lo que beneficia el control de la pureza del mandril. Las integrales de curva se utilizan para calcular el cambio de entalpía, cuantificando los cambios en la capacidad térmica del mandril. La aplicación de la calorimetría diferencial de barrido (DSC) en mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona información detallada sobre el comportamiento térmico, facilita el ajuste racional de las temperaturas de proceso mediante el análisis de la transformación y aporta evidencia experimental para la gestión térmica del material. La sensibilidad del método permite capturar pequeñas transiciones de fase, lo que abre una perspectiva basada en la temperatura para la optimización del rendimiento del mandril.

#### **4.1.4 Cuantificación de varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno según la medición de la conductividad térmica**

La cuantificación de la conductividad térmica en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se basa principalmente en métodos de estado estacionario o transitorio. Estas mediciones ayudan a evaluar la capacidad de disipación térmica del mandril durante la generación de calor durante el remachado, lo que orienta la selección del material en condiciones de carga térmica. Los métodos de estado estacionario implican calentar un extremo y enfriar el otro, midiendo el gradiente de temperatura y el flujo de calor; el ensayo axial de la muestra del mandril refleja la transferencia de calor real. Los métodos transitorios, como el centelleo láser, calientan un lado por pulsos y registran el aumento de temperatura en el otro, calculando así la conductividad térmica.

Los resultados cuantitativos reflejan la influencia de la composición. Una fase con mayor contenido de cobre produce una mayor conductividad térmica y un menor aumento de temperatura local en el mandril, lo que lo hace adecuado para el remachado continuo. Una fase con mayor concentración de tungsteno presenta una conductividad térmica relativamente baja, pero una gran capacidad calorífica, lo que amortigua las temperaturas pico. Para la preparación de la muestra, se corta una sección del mandril; una superficie lisa reduce la resistencia térmica de contacto. Químicamente, una interfaz limpia afecta la medición, ya que la dispersión de impurezas reduce la conductividad térmica.

Las mediciones cuantitativas de conductividad térmica guían las aplicaciones; los mandriles de alta conductividad térmica disipan el calor rápidamente, lo que resulta en un enfriamiento uniforme del remache; los mandriles de baja conductividad térmica ofrecen un mejor aislamiento, lo que los hace adecuados para el remachado en caliente. Las mediciones también evalúan la efectividad del tratamiento térmico, asegurando una microestructura uniforme y una conductividad térmica constante después del recocido. Para mandriles de longitudes variables, se toman mediciones en múltiples segmentos para promediar, evitando efectos finales. Las mediciones de conductividad térmica proporcionan una base para cuantificar el rendimiento de transferencia de calor de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno, y las comparaciones numéricas respaldan la selección de herramientas para la adaptación térmica, desempeñando un papel crucial en la gestión térmica del remachado. La naturaleza sistemática de las mediciones hace que el comportamiento térmico de los lotes de mandriles sea comparable, lo que contribuye a la retroalimentación cuantitativa para la mejora del proceso.

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



#### 4.1.5 El papel de la capacidad calorífica específica en la gestión térmica de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno

La capacidad calorífica específica en la gestión térmica de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se refleja principalmente en su capacidad para absorber y amortiguar el calor generado por el impacto. Esto ayuda a controlar el aumento de temperatura del mandril durante el remachado, evitando un sobrecalentamiento localizado que podría afectar su forma o rendimiento. Una mayor capacidad calorífica específica resulta en una mayor absorción de calor por parte del mandril, menores cambios de temperatura con la misma energía aplicada, un aumento de temperatura más gradual en la superficie de trabajo y una zona afectada por el calor más pequeña durante el conformado del remache. Las aleaciones de tungsteno contribuyen en gran medida a la capacidad calorífica específica, lo que resulta en una alta capacidad calorífica general del mandril y una lenta acumulación de calor durante el funcionamiento continuo.

El mecanismo de acción se refleja en la distribución de energía: parte de la energía cinética del impacto se convierte en calor, y este se dispersa cuando el calor específico es alto, lo que resulta en un gradiente de temperatura más suave dentro del mandril. Químicamente, la estructura bifásica funciona sinérgicamente: las partículas de tungsteno almacenan el calor y la fase aglutinante lo transfiere, lo que conduce a un rápido equilibrio térmico en el mandril. El calor específico también afecta la estabilidad del ciclo térmico; durante el remachado repetido, el mandril recupera rápidamente la temperatura ambiente con cambios dimensionales mínimos.

En cuanto a la gestión térmica, los mandriles con alta capacidad calorífica específica son adecuados para el remachado de alta frecuencia o de alta resistencia, ofreciendo un buen control del aumento de temperatura y una operación cómoda. El ajuste de la composición juega un papel fundamental: un alto contenido de tungsteno resulta en una alta capacidad calorífica específica, mientras que una mayor concentración de cobre contribuye a la conductividad térmica y facilita la disipación del calor. El tratamiento térmico homogeneiza la microestructura, garantizando una distribución uniforme de la capacidad calorífica específica. El papel de la capacidad calorífica específica en la gestión térmica de los mandriles de remache de aleación de tungsteno demuestra la función amortiguadora del material respecto a la capacidad calorífica, lo que facilita el control de la temperatura de la herramienta gracias a sus propiedades endotérmicas y proporciona una base térmicamente estable para la práctica del remachado. Este rendimiento mejorado permite que el mandril se adapte a más condiciones de trabajo, aumentando su comodidad operativa.

## 4. 2 Propiedades eléctricas y magnéticas de las tapas de remaches de aleación de tungsteno

Las propiedades eléctricas y magnéticas de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se ven influenciadas principalmente por su composición. Si bien estas propiedades no constituyen la función principal del mandril como herramienta, resultan valiosas como referencia en ciertos entornos de ensamblaje u operaciones auxiliares. Las propiedades eléctricas se caracterizan principalmente por la conductividad, mientras que las magnéticas dependen de si los elementos de la fase aglutinante

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

introducen ferromagnetismo. El tungsteno, por sí mismo, presenta una conductividad eléctrica y térmica moderada; la fase aglutinante, tras la aleación, ajusta los niveles generales. El sistema tungsteno-níquel-cobre no es magnético y presenta una buena conductividad eléctrica, mientras que el sistema tungsteno-níquel-hierro presenta un magnetismo significativo y una conductividad ligeramente inferior.

El análisis de las propiedades eléctricas y magnéticas facilita la selección del mandril adecuado para aplicaciones específicas, como evitar interferencias magnéticas en ensamblajes electrónicos y proporcionar conductividad para facilitar la descarga electrostática. Las pruebas de propiedades guían el diseño de la composición; las variantes de tungsteno-cobre presentan una alta conductividad, mientras que las de tungsteno-hierro poseen un magnetismo adecuado para la sujeción. Las propiedades eléctricas y magnéticas de los mandriles de remache de aleación de tungsteno reflejan la modulación del material de los elementos auxiliares, y estas diferencias en las propiedades contribuyen a la versatilidad de las aplicaciones de la herramienta, proporcionando una mayor adaptabilidad en las prácticas de remachado.

#### 4.2.1 Conductividad en varillas con remaches de aleación de tungsteno

La conductividad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno depende principalmente del tipo y la distribución de la fase aglutinante. Si bien no es un requisito principal, esto influye en la acumulación de electricidad estática y la conductividad térmica. El tungsteno en sí tiene una conductividad moderada; sin embargo, una red continua de fase de cobre dentro de la aleación resulta en una mayor conductividad, una transmisión de corriente uniforme y una fácil disipación de la electricidad estática en la superficie del mandril, evitando la adsorción de polvo o chispas durante el ensamblaje. Los sistemas de níquel-hierro tienen una conductividad relativamente menor, pero aun así es suficiente para aplicaciones de soporte mecánico.

El mecanismo se manifiesta en la estructura de pseudoaleación, donde la fase de cobre rellena los huecos para formar canales, lo que resulta en una baja resistencia a la migración de electrones y una conductividad axial uniforme en la varilla superior. Tras la sinterización, la interfaz queda limpia y la trayectoria conductora es continua. El trabajo en caliente y el laminado alargan la fase de cobre, lo que resulta en una ligera anisotropía en la conductividad y una baja resistividad general de la varilla superior. El pulido superficial reduce la capa de óxido, manteniendo una conductividad estable.

La conductividad también afecta la gestión térmica; se produce menos calentamiento Joule al pasar la corriente, lo que resulta en un aumento más lento de la temperatura en el mandril. Una buena estabilidad química garantiza que la conductividad del mandril no disminuya en ambientes húmedos. Las variantes de tungsteno-cobre presentan un rendimiento aún mejor, proporcionando un excelente control electrostático en salas blancas electrónicas. La conductividad de los mandriles de remache de aleación de tungsteno proporciona asistencia eléctrica a la herramienta, facilita la adaptación a entornos de ensamblaje mediante la optimización del canal y aporta características prácticas a las operaciones de remachado.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.2.2 Implicaciones de los parámetros magnéticos para la aplicación de remaches de aleación de tungsteno

Las implicaciones de los parámetros magnéticos para la aplicación de mandriles de remaches de aleación de tungsteno se derivan principalmente del ferromagnetismo resultante de la adición de hierro. Esto facilita el posicionamiento auxiliar o la sujeción en ciertas aplicaciones de ensamblaje. El sistema tungsteno-níquel-hierro presenta un magnetismo significativo, lo que permite que el mandril sea atraído por herramientas magnéticas, lo que facilita su fijación o reemplazo durante la operación, especialmente proporcionando un posicionamiento estable durante el remachado manual. El sistema tungsteno-níquel-cobre es amagnético, lo que evita la interferencia del campo magnético en el ensamblaje de instrumentos electrónicos o de precisión, garantizando así la integridad de los componentes.

El mecanismo se refleja en la solución sólida de la fase aglutinante, donde el hierro y el níquel forman una fase ferromagnética con magnetización moderada, lo que resulta en un ligero magnetismo en el mandril sin un magnetismo fuerte residual. El tratamiento térmico para la desmagnetización o el envejecimiento permite controlar el nivel magnético, lo que permite una aplicación flexible del mandril. La inspiración de los parámetros magnéticos también incluye la amortiguación magnética en entornos vibratorios, lo que mejora la absorción de microvibraciones por el mandril.

Implicaciones de la aplicación: Los mandriles magnéticos son adecuados para el posicionamiento mecánico asistido por línea, mientras que los no magnéticos se utilizan para equipos sensibles. La pureza química se controla mediante el contenido de hierro, y las propiedades magnéticas son controlables. Las implicaciones de los parámetros magnéticos para las aplicaciones de mandriles de remaches de aleación de tungsteno demuestran la modulación práctica de los elementos auxiliares, lo que facilita la operación de la herramienta mediante diferencias magnéticas y ofrece opciones de selección en diferentes escenarios de ensamblaje.

#### 4.2.3 Influencia del coeficiente de temperatura de resistencia en la estabilidad eléctrica de la varilla superior del remache de aleación de tungsteno

El coeficiente de temperatura de resistencia (TCR) en la estabilidad eléctrica de los mandriles de remache de aleación de tungsteno se refleja principalmente en la regulación del comportamiento de resistencia bajo cambios de temperatura. Esta influencia ayuda a comprender la conductividad y la respuesta electrostática potencial del mandril en entornos de remachado de temperatura variable. El TCR describe la tendencia de cambio de resistencia con el aumento de la temperatura. En mandriles de aleación de tungsteno, está determinado conjuntamente por la fase de tungsteno y la fase aglutinante. La fase de tungsteno tiene un TCR positivo pero bajo, mientras que la fase aglutinante, como el cobre o el níquel, tiene un coeficiente más alto. En general, el coeficiente es positivo y la resistencia aumenta con el aumento de la temperatura. La estabilidad eléctrica del mandril se manifiesta bajo fluctuaciones de temperatura. Cuando el coeficiente es bajo, el cambio de resistencia es pequeño, la ruta conductora permanece continua y los saltos de resistencia inducidos por la temperatura no afectan las funciones auxiliares como la descarga electrostática.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

interacción de dos fases : la dispersión de electrones de las partículas de tungsteno aumenta con el aumento de la temperatura, y los cambios en la concentración del portador en la fase aglutinante regulan la resistividad general. El tratamiento térmico homogeneiza la microestructura, lo que resulta en una distribución de coeficientes consistente y una resistividad axial estable de la varilla superior. Los ajustes de composición afectan al coeficiente; cuando la fase de cobre es más abundante, el coeficiente se aproxima a la respuesta lineal del cobre, y la conductividad de la varilla superior es más estable bajo variaciones de temperatura. La formación de una capa de óxido superficial a altas temperaturas aumenta ligeramente el coeficiente, pero el efecto protector del recubrimiento se mitiga y el comportamiento eléctrico de la varilla superior permanece inalterado. El efecto del coeficiente de temperatura de resistencia (TCR) también se utiliza para evaluar la gestión térmica del mandril. Un TCR bajo resulta en una resistencia generada térmicamente menor y un aumento de temperatura autolimitado en el mandril. A bajas temperaturas, el TCR es positivo, lo que indica una disminución de la resistencia, pero esto no está directamente relacionado con la fragilidad. El TCR se observa mediante el método de cuatro sondas para guiar la optimización de la aleación. La influencia del TCR en la estabilidad eléctrica de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una perspectiva del material sobre la respuesta a la temperatura. El ajuste del TCR facilita la adaptación de la conductividad de la herramienta, lo que proporciona una base estable durante las variaciones de temperatura del remachado.

#### 4.2.4 Observaciones del análisis del bucle de histéresis en mandriles de remaches de aleación de tungsteno

El análisis del bucle de histéresis en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se utiliza principalmente para evaluar el comportamiento magnético y la remanencia, lo que ayuda a comprender la respuesta del mandril y el potencial de posicionamiento en entornos de campo magnético. El bucle de histéresis representa una curva cíclica de magnetización en función de un campo magnético externo. En mandriles de aleación de tungsteno, esto está determinado por el ferromagnetismo de la fase aglutinante; la fase de tungsteno es no magnética. El bucle de histéresis es ancho en el sistema níquel-hierro, con coercitividad y remanencia significativas, mientras que el bucle de histéresis es estrecho y casi lineal en el sistema no magnético tungsteno-cobre. Las observaciones se realizan utilizando un magnetómetro de muestra vibrante, con la muestra del mandril colocada en un campo magnético alterno, y se registran las curvas de magnetización.

El mecanismo de observación se refleja en el magnetismo de fase. El movimiento de las paredes del dominio magnético en la fase ferrosa produce histéresis, y la remanencia después de que la varilla superior se magnetiza hasta la saturación es pequeña, lo que facilita la sujeción magnética. El tratamiento térmico ajusta la forma del bucle de histéresis, y el envejecimiento refina la fijación de las paredes del dominio magnético; los cambios en el área del bucle de histéresis reflejan la uniformidad de la microestructura. La composición afecta la observación; un alto contenido de hierro da como resultado un bucle de histéresis más ancho y una respuesta magnética más fuerte de la varilla superior; los sistemas de cobre tienen bucles de histéresis más estrechos y menos interferencia magnética de la varilla superior. El análisis del bucle de histéresis se aplica en el control de calidad del mandril; los bucles anormales revelan segregación o defectos, guiando el proceso hacia una mezcla uniforme. La observación de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

remanencia evalúa la compatibilidad magnética de los mandriles en el ensamblaje electrónico, siendo más adecuados los tipos de bucle más estrechos. El tratamiento de la superficie no afecta directamente al bucle, pero el recubrimiento aísla el campo magnético. El análisis del bucle de histéresis en mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una perspectiva cuantitativa sobre las propiedades magnéticas, respaldando la selección magnética de herramientas a través de características de curva y contribuyendo con conocimientos prácticos en conjuntos especializados.

#### 4.3 Propiedades ópticas y de radiación de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno

Los mandriles para remaches de aleación de tungsteno se ven influenciados principalmente por su composición superficial y microestructura. Si bien estas propiedades no son esenciales cuando el mandril se utiliza como herramienta, son importantes para comprender la reflexión de la luz y la respuesta a la radiación en ciertos entornos de ensamblaje. Las propiedades ópticas se caracterizan principalmente por la reflectividad, mientras que las propiedades de radiación se centran en la resistencia a la radiación. La microestructura bifásica de las aleaciones de tungsteno confiere estas propiedades: la fase de tungsteno presenta una superficie lisa y una fuerte reflexión, mientras que la fase aglutinante modula la absorción de la radiación. El análisis de las propiedades ópticas y de radiación facilita la selección de mandriles para aplicaciones específicas, como la prevención del deslumbramiento en ensamblajes ópticos y el mantenimiento de la estabilidad en entornos de radiación.

La interacción entre las propiedades ópticas y de radiación permite que el mandril se adapte a las condiciones variables de luz o radiación. Una alta reflectividad produce una superficie brillante y fácil de limpiar, mientras que una buena tolerancia a la radiación minimiza los cambios microestructurales. Las pruebas de características guían el tratamiento de la superficie, la medición de la reflectividad optimiza el pulido y las pruebas de radiación evalúan las transiciones de fase. Las propiedades ópticas y de radiación de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno reflejan la respuesta del material a la luz, y el ajuste de las propiedades facilita la adaptabilidad de la herramienta y proporciona estabilidad adicional en las prácticas de remachado.

##### 4.3.1 Correlación del análisis de reflectividad en varillas maestras de remaches de aleación de tungsteno

La relevancia del análisis de reflectividad en mandriles de remaches de aleación de tungsteno reside principalmente en la evaluación del acabado superficial y la respuesta óptica. Este análisis ayuda a comprender el rendimiento del mandril y su comportamiento frente a la radiación térmica bajo iluminación. La reflectividad describe la proporción de luz reflejada por una superficie y está determinada por el estado superficial de las fases de tungsteno y aglutinante en el mandril. Una mayor reflectividad tras el pulido da como resultado una apariencia más brillante, lo que facilita la observación del proceso de deformación del remache. Las capas químicas de óxido superficial reducen la reflectividad, mientras que los recubrimientos o la pasivación restauran el efecto espejo.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



El mecanismo de correlación se manifiesta en la microestructura: las partículas de tungsteno tienen una superficie lisa con fuerte reflexión, una fase aglutinante distribuida uniformemente con baja dispersión de luz y reflectividad constante. Después del tratamiento térmico, los granos se refinan, lo que da como resultado una distribución de reflectividad más uniforme y menos deslumbramiento durante el ensamblaje del mandril. El análisis de reflectividad se utiliza para el control de calidad; los valores medidos altos indican menos defectos superficiales y mejor resistencia al desgaste del mandril. La respuesta de la longitud de onda se observa utilizando un espectrofotómetro; el brillo metálico del mandril refleja una fuerte luz visible. El análisis de correlación también afecta la gestión térmica; una mayor reflectividad da como resultado una menor pérdida de calor radiativo y un aumento de temperatura más lento en el mandril. La textura de la superficie ajusta la reflectividad; el acabado cepillado reduce la reflexión especular, lo que lo hace adecuado para aplicaciones antideslumbrantes. Las variaciones de composición también tienen una correlación; una fase de cobre más alta da como resultado una reflectividad ligeramente mayor y una apariencia de mandril más brillante. La correlación del análisis de reflectividad en mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una base para la óptica de superficie, respalda la adaptación visual de la herramienta a través de la evaluación de la respuesta a la luz y aporta características prácticas en entornos de ensamblaje.

#### 4.3.2 Evaluación de la resistencia a la radiación de las tapas de remaches de aleación de tungsteno

La tolerancia a la radiación en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se obtiene principalmente mediante pruebas de exposición a la radiación y la observación microestructural. Esta evaluación ayuda a comprender la estabilidad estructural y la retención del rendimiento del mandril en condiciones de radiación. La tolerancia a la radiación describe la resistencia de un material a la radiación o a las partículas. En el mandril, la alta densidad de la fase de tungsteno atenúa la radiación, mientras que la fase aglutinante coordina la respuesta al daño. El proceso de evaluación implica examinar los cambios de densidad y los defectos microscópicos tras la exposición de la muestra. El mandril mostró una hinchazón mínima y una microestructura intacta tras la radiación.

El mecanismo de evaluación se refleja en la estructura de fases: las partículas de tungsteno absorben energía para crear vacantes y la fase aglutinante se difunde para reparar defectos, lo que resulta en una buena estabilidad general del mandril. El tratamiento térmico mejora la tolerancia a la radiación y la alta temperatura de recristalización impide la acumulación de daños. El mandril se evalúa para su uso en ensamblajes médicos o nucleares; su degradación del rendimiento bajo radiación es lenta y su soporte es fiable. Las pruebas implican la exposición a gradientes de dosis para observar la iniciación de grietas y las transiciones de fase.

La evaluación de la tolerancia a la radiación también orienta la optimización de la composición, la dopación con tierras raras para los defectos de fijación y aumenta el umbral de tolerancia. Los recubrimientos superficiales protegen contra la radiación incidente, lo que minimiza los cambios en la microestructura del mandril. Los resultados de la evaluación se incorporan al proceso, demostrando una alta tolerancia tras la sinterización y la densificación. La evaluación de la tolerancia a la radiación de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una perspectiva de material adaptable al

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

entorno, respalda la compatibilidad de la herramienta con la radiación mediante el análisis de daños y proporciona una base sólida para aplicaciones especiales de remachado.

#### 4.3.3 Caracterización del espectro de absorción en las propiedades ópticas de mandriles de remaches de aleación de tungsteno

La caracterización de las propiedades ópticas de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno mediante espectroscopia de absorción se logra principalmente mediante análisis espectroscópicos ultravioleta-visible-infrarrojo cercano. Esta caracterización ayuda a comprender el comportamiento de absorción de luz de la superficie del mandril y la estructura general, y a evaluar sus características de reflexión y transmisión a diferentes longitudes de onda. Los espectros de absorción registran la intensidad de absorción del material para longitudes de onda de luz específicas. Las pruebas se realizan en muestras de mandriles pulidos; los picos de absorción característicos se generan por transiciones electrónicas en la fase de tungsteno, mientras que las fases aglutinantes como el cobre o el níquel modulan la forma espectral. Químicamente, la capa de óxido superficial aumenta la absorción; el pulido elimina esta capa, lo que resulta en líneas espectrales más suaves.

La clave del proceso de caracterización reside en la preparación de la muestra. La sección transversal o superficie de la sonda debe ser plana y el haz de luz debe incidir perpendicularmente durante la prueba para registrar la curva de absorción. Las sondas de aleación de tungsteno presentan una alta absorción en la región visible, con la consiguiente disminución de la reflectividad. La textura cepillada de la superficie aumenta la dispersión y la absorción de la luz. Los cambios microestructurales tras el tratamiento térmico afectan las líneas espectrales; el recocido refina los granos y garantiza una absorción uniforme. Los ajustes de composición contribuyen a las diferencias en la caracterización; un mayor contenido de fase de cobre produce una mayor absorción en el infrarrojo cercano, y el comportamiento de la sonda frente a la radiación térmica varía.

La aplicación de la espectroscopia de absorción es evidente en el control de calidad de superficies; las anomalías de absorción revelan oxidación o contaminación, lo que orienta los procesos de pulido. Los espectros de absorción de mandriles en entornos de ensamblaje iluminados evalúan el deslumbramiento; las líneas espectrales planas indican reflejos más suaves. Las pruebas de estabilidad química revelan cambios en los espectros de absorción, con picos de absorción que varían tras la corrosión. La caracterización de las propiedades ópticas de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno mediante espectroscopia de absorción proporciona una perspectiva espectroscópica de la interacción con la luz, facilita la optimización de la superficie de la herramienta mediante el análisis de curvas y proporciona una base para la adaptación visual durante las operaciones de remachado.

#### 4.3.4 Contribución de la sección transversal de absorción de neutrones al blindaje contra la radiación de la varilla superior del remache de aleación de tungsteno

La sección transversal de absorción de neutrones para el blindaje contra la radiación de la varilla superior remachada de aleación de tungsteno reside principalmente en su capacidad para atenuar el flujo

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

neutrónico. Esta contribución ayuda a reducir el impacto de la radiación neutrónica cuando la varilla superior se utiliza como componente auxiliar de blindaje. Los núcleos de tungsteno presentan altas secciones transversales de dispersión y absorción de neutrones; la estructura de alta densidad de la varilla superior mejora la atenuación volumétrica, y la fase de enlace modula la respuesta general. La sección transversal de absorción neutrónica describe la probabilidad de reacciones nucleares; los isótopos de tungsteno contribuyen principalmente a la dispersión y moderan la energía neutrónica.

El mecanismo de contribución se manifiesta en la dispersión múltiple. Tras entrar en la varilla superior, los neutrones pierden energía cinética mediante múltiples colisiones, y una parte se absorbe. La atenuación es más pronunciada a medida que aumenta el grosor de la varilla superior. Químicamente, la introducción de núcleos ligeros, como el hidrógeno, en los elementos de aleación puede ayudar a moderar la dispersión; sin embargo, el sistema de la varilla superior está dominado por el tungsteno, por lo que la dispersión es el proceso principal. El tratamiento térmico no modifica la sección transversal, pero mejora la vía de dispersión efectiva al lograr una microestructura más uniforme.

La contribución de la sección transversal de absorción de neutrones se evaluó mediante simulación o experimentos. El mandril actúa como un escudo local en un entorno de radiación, reduciendo el impacto de los neutrones dispersos en el entorno circundante. Los ajustes de composición afectan esta contribución; un mayor contenido de tungsteno resulta en una sección transversal más resistente y un efecto de blindaje más estable. El estado de la superficie influye en la radiación incidente; el pulido reduce la pérdida por reflexión. La contribución de la sección transversal de absorción de neutrones del mandril de remache de aleación de tungsteno proporciona una perspectiva de física nuclear sobre la interacción de la radiación, lo que contribuye a la seguridad de las herramientas en ensambles relacionados con la radiación mediante la atenuación y desempeña un papel de blindaje en entornos especiales.

#### **4.4 Hoja de datos de seguridad de las varillas con remaches de aleación de tungsteno de CTIA GROUP LTD**

La Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) para mandriles de remache de aleación de tungsteno fabricados por Zhongwu Intelligent Manufacturing es un documento de información de seguridad para las herramientas con forma de varilla de aleación de tungsteno producidas por Zhongwu Intelligent Manufacturing. Este documento cumple con las normas internacionales y las regulaciones nacionales pertinentes, y proporciona una evaluación de riesgos y directrices de protección para los materiales durante la producción, el transporte, el almacenamiento, el uso y la eliminación. Los mandriles de aleación de tungsteno de Zhongwu Intelligent Manufacturing incluyen principalmente las series de tungsteno-níquel-hierro y tungsteno-níquel-cobre, que se utilizan en el ensamblaje y la conexión de componentes, etc.

La estructura general de una MSDS suele dividirse en varias secciones, cada una de las cuales analiza el comportamiento del material desde una perspectiva química. Por ejemplo, la información sobre la composición destaca las propiedades compuestas del mandril de aleación de tungsteno, donde el

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

tungsteno es el elemento principal que proporciona una base de alta densidad, mientras que los elementos aglutinantes, como el níquel y el hierro, afectan las posibles reacciones de contacto con la piel. Durante el proceso de compilación, China Tungsten Manufacturing Co., Ltd. consideró las características de preparación pulvimetalúrgica de la aleación. Los procesos de sinterización y laminación pueden introducir trazas de impurezas; por lo tanto, el documento especifica medidas de control de pureza para evitar riesgos adicionales causados por óxidos o carburos. La sección de transporte analiza la estabilidad del mandril de aleación en forma sólida, haciendo hincapié en el embalaje a prueba de humedad para prevenir la oxidación de la superficie. La eliminación de residuos guía el reciclaje, el cumplimiento de los requisitos ambientales y la recuperación de recursos de tungsteno mediante reducción química.

Para los mandriles de remachado de aleación de tungsteno, se detalla la composición química de la aleación. Típicamente, el tungsteno es el componente dominante, proporcionando la base para una alta densidad y dureza, complementado con níquel, hierro o cobre como fases aglutinantes. Las proporciones se ajustan según la serie; por ejemplo, en un sistema de tungsteno-níquel-hierro, la relación níquel-hierro equilibra la humectación y el fortalecimiento. Los oligoelementos como el carbono y el oxígeno se controlan en niveles bajos para evitar la formación de fases de fragilización. Químicamente, esta sección utiliza números CAS para identificar los elementos; tungsteno CAS 7440-33-7, níquel CAS 7440-02-0. Se divulgan las impurezas, incluyendo contaminantes potenciales como fósforo y azufre, provenientes de las materias primas, haciendo énfasis en los procesos de purificación para reducir su contenido.

El mandril de aleación de tungsteno también incluye una descripción de la estructura de la fase de la aleación. En el compuesto bifásico, las partículas de tungsteno son cúbicas centradas en el cuerpo, y la fase aglutinante es una solución sólida cúbica centrada en las caras. Es químicamente estable y no contiene componentes volátiles. El análisis de solubilidad muestra que el material es insoluble en agua, reacciona lentamente en ácidos débiles y libera tungstato. La declaración de pureza indica que el mandril de aleación se prepara mediante pulvimetalurgia y presenta una alta consistencia entre lotes.

Para los mandriles de remache de aleación de tungsteno de Zhongwu Intelligent Manufacturing, se evalúan sistemáticamente los riesgos para la salud, físicos y ambientales del material, basándose en la reactividad química de la composición de la aleación. Los riesgos para la salud se centran principalmente en el polvo o los residuos generados durante el procesamiento; las partículas de tungsteno pueden causar irritación mecánica, mientras que el níquel tiene potencial sensibilizante, lo que provoca reacciones alérgicas cutáneas o respiratorias. Los riesgos físicos incluyen el riesgo de impacto debido a la alta densidad del mandril de aleación y la posible fuente de ignición por las chispas generadas durante el corte. La evaluación de riesgos ambientales considera la baja solubilidad de las aleaciones de tungsteno, que no se filtran fácilmente al suelo al desecharse; sin embargo, el polvo puede afectar a los organismos acuáticos mediante la acumulación de sedimentos.

El método de identificación adopta el estándar GHS y la varilla superior de aleación de tungsteno se clasifica como un sólido no peligroso.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Capítulo 5 Propiedades mecánicas de las varillas de remache de aleación de tungsteno

### 5.1 Resistencia y dureza de las tapas de remaches de aleación de tungsteno

Los mandriles de remaches de aleación de tungsteno poseen propiedades mecánicas fundamentales que determinan su resistencia a la deformación y durabilidad durante los procesos de remachado, tanto a impactos como a soportes. La resistencia incluye la resistencia a la tracción, la compresión y el impacto, mientras que la dureza refleja la resistencia de la superficie a la indentación y al desgaste. La estructura bifásica de las aleaciones de tungsteno confiere estas propiedades: las partículas de tungsteno proporcionan un esqueleto de alta dureza, mientras que la fase aglutinante coordina la tenacidad, previniendo la fractura frágil. Este equilibrio entre resistencia y dureza permite que el mandril resista cargas repetidas, lo que resulta en una formación uniforme del remache.

La resistencia y la dureza se obtienen mediante el proceso de pulvimetalurgia, seguido de un tratamiento térmico para refinar la microestructura tras la sinterización y la densificación, lo que resulta en una alta resistencia axial y una dureza superficial uniforme del mandril. Químicamente, la unión interfacial es fuerte y la distribución de tensiones es gradual. Se emplean métodos de prueba estandarizados, donde la resistencia se evalúa mediante ensayos de tracción o impacto, y la dureza se mide por indentación. La optimización del rendimiento se logra mediante ajustes en la composición y el tratamiento térmico; un mayor contenido de tungsteno resulta en una mayor dureza, mientras que una mayor proporción de fase aglutinante promueve una mayor tenacidad.

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno en las remachadoras ofrecen un soporte fiable, una deformación mínima del mandril y una conexión estable. En las aplicaciones, la resistencia y la dureza se adaptan al material del remache; se utilizan mandriles de alta resistencia para remaches de acero, mientras que los mandriles equilibrados para remaches de aluminio. La resistencia y la dureza de los mandriles de aleación de tungsteno demuestran las ventajas mecánicas de los materiales compuestos, lo que facilita la mejora de los procesos de ensamblaje mediante la coordinación del rendimiento y aporta valor práctico en las conexiones industriales.

#### 5.1.1 Método para la prueba de resistencia a la tracción en mandriles de remaches de aleación de tungsteno

El método de ensayo de resistencia a la tracción para mandriles de remaches de aleación de tungsteno emplea principalmente el ensayo de tracción estándar. Este método evalúa la capacidad de carga a la tracción y el comportamiento a la fractura del mandril mediante carga uniaxial, lo que ayuda a comprender la respuesta del material a la tensión de tracción. Las muestras de ensayo se cortan del mandril o se mecanizan en formas cilíndricas o de mancuerna utilizando una pieza bruta especial, con superficies lisas para evitar la concentración de tensiones. La máquina de ensayo sujeta ambos extremos de la muestra, aplica una tensión uniforme y registra las curvas de carga-desplazamiento. El deslizamiento por dislocación química y la separación de la interfaz dominan el proceso de deformación.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



El método implica la alineación de precarga, la carga continua y la medición posterior a la fractura. La fase aglutinante del mandril coordina la deformación de las partículas de tungsteno, y la curva de tracción muestra segmentos elásticos y dúctiles. La observación y el análisis de la superficie de fractura revelan un mecanismo de fractura dúctil con hoyuelos que indican fractura dúctil y tendencia a la fragilidad en los planos de clivaje. El entorno de prueba está a temperatura ambiente controlada; cualquier efecto relacionado con la temperatura debe anotarse. Este método de prueba de resistencia a la tracción para mandriles de aleación de tungsteno revela una sinergia bifásica: la fase de tungsteno soporta cargas elevadas, mientras que la fase aglutinante absorbe energía.

La prueba se aplica en la aceptación de materiales y la verificación de procesos. Tras la sinterización, se evalúa la resistencia a la tracción del mandril para determinar su densidad y se compara el efecto de refuerzo tras el tratamiento térmico. La pureza química afecta la prueba; las impurezas reducen la resistencia. La estructura en forma de varilla del mandril permite el muestreo axial, lo que refleja la tensión real. El método de prueba de resistencia a la tracción en mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona un enfoque cuantitativo de las propiedades de tracción, facilita la evaluación de la resistencia de la herramienta mediante el análisis de curvas y proporciona una referencia para el diseño de remachados.

#### **5.1.1.1 Mecanismo de fractura de las tapas de remaches de aleación de tungsteno bajo carga estática**

Los mandriles de remaches de aleación de tungsteno sometidos a carga estática se caracterizan principalmente por la respuesta a la tensión y la acumulación de daños en la microestructura bifásica. Este mecanismo se demuestra en ensayos de tracción o flexión, lo que ayuda a analizar el modo de fallo del mandril bajo carga lenta. En la etapa inicial, se produce una deformación elástica, donde el esqueleto de partículas de tungsteno soporta la tensión principal y la fase aglutinante coordina la deformación. A medida que aumenta la carga, las dislocaciones se multiplican en la fase aglutinante, la tensión se concentra en la interfaz y, si bien químicamente la zona de difusión de elementos proporciona amortiguación, la segregación de impurezas facilita la formación de microporos.

En las últimas etapas del proceso, los microporos se fusionan para formar huecos, lo que provoca el estrechamiento de los granos de tungsteno. La fase aglutinante entre los granos de tungsteno se estira y adelgaza, y la separación de la interfaz o fractura del grano predomina en la falla final. Las características de fractura muestran una combinación de hoyuelos y clivaje, con más hoyuelos en la fase aglutinante y superficies de clivaje planas en la fase de tungsteno. El tratamiento térmico optimiza el mecanismo; el recocido refina los granos, reduce la formación de huecos y mejora la ductilidad de los granos de tungsteno.

El mecanismo de carga estática también se ve influenciado por la composición. El sistema níquel-cobre presenta una alta relación de hoyuelos y una gran elongación por fractura; el sistema níquel-hierro presenta alta resistencia, pero una ligera tendencia a la clivaje. Una menor pureza química resulta en menos impurezas y un mecanismo más dúctil. La fuerza sobre el mandril en forma de varilla es axial y

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

el mecanismo se distribuye a lo largo de su longitud. El mecanismo de fractura del mandril de remache de aleación de tungsteno bajo carga estática refleja la trayectoria de falla de los materiales compuestos, respalda el diseño de la resistencia de la herramienta mediante la regulación de la microestructura y proporciona una comprensión mecanicista de los soportes de remachado.

#### 5.1.1.2 Efecto de la carga dinámica en la varilla superior del remache de aleación de tungsteno

La carga dinámica en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se manifiesta principalmente en la absorción de energía de impacto y la respuesta a la deformación. Este efecto es evidente en condiciones de remachado a alta velocidad o vibración, donde el mandril actúa como componente de soporte que soporta cargas elevadas instantáneas. Durante la carga dinámica, la energía se introduce rápidamente, el esqueleto de partículas de tungsteno resiste la compresión, la fase de unión coordina la deformación para absorber parte de la energía cinética, la indentación en la superficie de trabajo del mandril es uniforme y la cola del remache tiene una forma uniforme. Las dislocaciones químicas se multiplican rápidamente, las ondas de tensión se propagan dentro del mandril y la unión de la interfaz amortigua y previene la separación.

Los efectos también incluyen efectos de velocidad de deformación, con un ligero aumento de la resistencia bajo carga dinámica y una resistencia mejorada a la deformación del mandril, pero las cargas excesivas pueden inducir microdaños. Los efectos térmicos acompañan a la carga dinámica, con el calentamiento por fricción causando aumentos localizados de temperatura, y la conductividad térmica de la aleación de tungsteno ayudando a la disipación de calor, lo que resulta en un pequeño gradiente de temperatura en el mandril. La carga dinámica repetida acumula fatiga, lo que lleva a una propagación más lenta de microdefectos en el mandril y una vida útil estable. Los factores que influyen en la carga dinámica incluyen el diámetro del mandril y la forma de la cara final; los diámetros mayores resultan en una inercia más fuerte y una mejor absorción de energía, mientras que las superficies cóncavas reducen la concentración de tensión y minimizan la deformación. La optimización del tratamiento térmico también juega un papel; el recocido reduce la tensión residual, lo que lleva a una respuesta dinámica más suave en el mandril. El impacto de la carga dinámica en los mandriles de remache de aleación de tungsteno refleja el comportamiento del material en entornos de impacto, lo que respalda la adaptación dinámica de la herramienta a través de la absorción y la coordinación, lo que contribuye a la estabilidad práctica en el remachado de alta velocidad.

#### 5.1.2 Cuantificación de la dureza Vickers en mandriles de remaches de aleación de tungsteno

La cuantificación de la dureza Vickers en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se logra principalmente mediante la prueba de penetración con diamante. Esta cuantificación ayuda a evaluar la resistencia superficial del mandril a la penetración, lo que refleja su durabilidad durante el desgaste del remachado. La prueba implica pulir la muestra del mandril, aplicar una carga con el penetrador para crear una penetración cuadrada y medir la diagonal para calcular el valor de dureza. Químicamente, la fase de tungsteno domina la dureza, mientras que la fase aglutinante modula la dureza general. Una alta dureza en la superficie de trabajo del mandril contribuye a su resistencia a la penetración del remache. La

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

uniformidad del proceso de cuantificación se evalúa mediante mediciones multipunto; una dureza constante a lo largo del eje y la cara final de la varilla indica una microestructura estable. El tratamiento térmico afecta la cuantificación; el recocido reduce la dureza y aumenta la tenacidad, mientras que la precipitación por envejecimiento aumenta la dureza y refuerza la superficie. Los ajustes de composición cuantifican las diferencias; un mayor contenido de tungsteno aumenta la dureza, mientras que un mayor contenido de fase de cobre proporciona una dureza moderada. Los tratamientos superficiales, como el enchapado, cuantifican la dureza superficial y mejoran la resistencia al desgaste de la varilla. La cuantificación de la dureza Vickers orienta la selección del mandril; los mandriles de alta dureza se utilizan para remaches duros, mientras que los de baja dureza equilibran la absorción de impactos. La cuantificación también evalúa los resultados del mecanizado, garantizando una dureza uniforme y una superficie del mandril consistente tras el rectificado. La cuantificación de la dureza Vickers en mandriles para remaches de aleación de tungsteno proporciona una referencia numérica de las propiedades superficiales, facilita la evaluación de la resistencia al desgaste de la herramienta mediante el análisis de indentación y contribuye al control de calidad en la práctica del remachado.

### 5.1.3 Evaluación de varillas de remache de aleación de tungsteno mediante pruebas de tracción

Los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se obtienen principalmente mediante ensayos de tracción uniaxial. Esta evaluación ayuda a comprender la capacidad de carga y el comportamiento a la fractura del mandril bajo tensión de tracción, proporcionando una referencia de resistencia para los soportes de remache. La muestra de prueba se corta del mandril en una forma estándar, se sujeta y se estira a velocidad constante. Se registra la curva de carga-desplazamiento. Químicamente, la fase aglutinante extiende y coordina las partículas de tungsteno. La curva muestra el segmento elástico y el segmento plástico.

El proceso de evaluación analizó el límite elástico y la elongación a la fractura. Una alta proporción de la fase aglutinante en el mandril resultó en una buena plasticidad, mientras que la fase de tungsteno predominó, lo que resultó en una alta resistencia. La observación de la superficie de fractura evaluó el mecanismo; las hendiduras indicaron ductilidad, mientras que los planos de clivaje mostraron una tendencia a la fragilidad. Se evaluó la eficacia del tratamiento térmico; el recocido mejoró la elongación y la tenacidad del mandril. Se evaluaron las diferencias de composición; el sistema níquel-cobre mostró una alta ductilidad, mientras que el sistema níquel-hierro mostró una alta resistencia.

Las pruebas de tracción evalúan las propiedades axiales de los mandriles, mientras que la tensión en forma de barra simula las cargas laterales. Esta evaluación guía el proceso de fabricación; la sinterización garantiza una resistencia a la tracción estable, mientras que el trabajo en caliente y la fibrización aumentan la resistencia. Las pruebas de tracción proporcionan una perspectiva experimental sobre la respuesta a la tracción de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno, lo que facilita la comprensión de la resistencia de la herramienta mediante curvas y superficies de fractura, y proporciona una base de evaluación para el diseño de remachados.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 5.1.4 Evaluación de las tapas de remaches de aleación de tungsteno mediante pruebas de compresión

Los ensayos de compresión de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se realizan principalmente mediante ensayos de compresión axial. Esta evaluación ayuda a comprender la capacidad de carga a la compresión y el comportamiento de deformación del mandril en el soporte del remache, proporcionando una referencia para el rendimiento de la herramienta bajo cargas de impacto. La muestra de ensayo es una sección cilíndrica corta cortada del mandril, con caras frontales paralelas y lisas. La máquina de ensayo aplica una carga axial y registra la curva de tensión-deformación. Químicamente, el esqueleto de partículas de tungsteno resiste la compresión, mientras que la fase aglutinante coordina la expansión lateral, evitando la deformación prematura del cilindro.

El proceso de evaluación analizó el límite elástico y la resistencia última. La estructura bifásica del mandril provocó que la curva de compresión mostrara una meseta plástica después del segmento elástico, donde la fase aglutinante se extendía y absorbía energía. Se observó abombamiento lateral en la muestra fracturada; se observó una deformación uniforme cuando el mandril presentó buena tenacidad. El entorno de prueba se controló a temperatura ambiente y se utilizaron variantes de alta temperatura para evaluar el ablandamiento térmico. La evaluación de la prueba de compresión del mandril de aleación de tungsteno reveló la respuesta a la compresión; un alto contenido de tungsteno resultó en una resistencia estable, y la relación de la fase aglutinante se equilibró adecuadamente con la tenacidad.

Las pruebas de compresión orientan el proceso de evaluación. La densificación sinterizada produce una alta resistencia a la compresión, mientras que la fibrosización por trabajo en caliente mejora la resistencia a la compresión axial. La pureza química influye en la evaluación; las impurezas reducen la resistencia. Las características de varilla del mandril permiten la simulación de la compresión del soporte real. Las pruebas de compresión proporcionan una perspectiva experimental sobre la tensión de compresión en la evaluación de mandriles de remaches de aleación de tungsteno. El análisis de curvas facilita la comprensión de la capacidad de carga de la herramienta y contribuye a la base de la evaluación en la práctica del remachado.

##### 5.1.4.1 Estudio sobre la influencia de la velocidad de deformación en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno

Los estudios sobre el efecto de la velocidad de deformación en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se centran principalmente en la respuesta de la velocidad de carga a la deformación y la resistencia. Esta investigación ayuda a analizar las diferencias en el rendimiento del mandril a diferentes velocidades de remachado. A bajas velocidades de deformación, la deformación del mandril es lenta; la fase aglutinante coordina eficazmente las partículas de tungsteno, lo que resulta en una resistencia estable y una meseta plástica prolongada. A altas velocidades de deformación, como durante el remachado por impacto, la multiplicación de las dislocaciones es rápida, lo que aumenta la resistencia del mandril, pero reduce su plasticidad. Químicamente, la fase aglutinante muestra sensibilidad a la velocidad de deformación, modulando la respuesta general.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El estudio empleó ensayos de compresión gradual o de caída de peso, registrando curvas para comparar el comportamiento de fluencia y fractura. A altas tasas de deformación, el calentamiento adiabático provocó un ablandamiento localizado del mandril, pero la estructura de tungsteno proporcionó una restricción, lo que permitió un buen control de la deformación. El estudio reveló una sinergia bifásica: la proporción de partículas de tungsteno fue insensible, proporcionando rigidez, mientras que la proporción de la fase aglutinante fue sensible, absorbiendo energía. Se investigó el tratamiento térmico, demostrando que el recocido redujo la tasa de cambio y que el mandril se adaptó a un amplio rango de tasas de compresión.

El estudio del efecto de la velocidad de deformación guía las aplicaciones; el remachado manual con baja velocidad de deformación presenta buena tenacidad, mientras que el remachado neumático prioriza la resistencia con alta velocidad de deformación. Los estudios de composición química muestran que predomina la fase de cobre, lo que resulta en una baja sensibilidad a la velocidad de deformación y estabilidad del mandril a alta velocidad. El estudio del efecto de la velocidad de deformación en mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una perspectiva del material sobre la carga dinámica, y las comparaciones de velocidades facilitan la adaptación de la velocidad de la herramienta, aportando conocimientos a la investigación sobre el remachado a velocidad variable.

#### **5.1.4.2 Perspectivas del análisis de la superficie de fractura en las partes superiores de los remaches de aleación de tungsteno**

El análisis de la superficie de fractura proporciona información sobre los mandriles de remaches de aleación de tungsteno, principalmente mediante la observación mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) de las superficies de fractura por compresión o tracción. Este análisis revela los mecanismos de fallo y las características microestructurales, lo que contribuye a mejorar el diseño de mandriles resistentes al impacto. Las características de la superficie de fractura muestran una combinación de hoyuelos y clivaje; la profundidad de los hoyuelos en la región de la fase ligada refleja ductilidad, mientras que la planitud de las superficies de clivaje del grano de tungsteno indica fragilidad general. Químicamente, se observa una distribución elemental en las zonas de separación interfacial, con una segregación significativa de impurezas cuando el ligado es débil.

La limpieza de la muestra tras la fractura reveló una trayectoria de fractura compleja en la varilla superior. Las imágenes de microscopía electrónica de alto aumento mostraron que la fractura se extendía a lo largo de la fase aglutinante, y las partículas de tungsteno presentaban una fractura mínima. El análisis de diferentes condiciones de carga reveló numerosas hendiduras en la superficie de la fractura estática y bandas de cizallamiento distintivas en la fractura dinámica. El análisis del tratamiento térmico mostró hendiduras uniformes tras el recocido, mientras que el envejecimiento alteró la trayectoria de fractura debido a la precipitación por enclavamiento.

El análisis de la superficie de fractura proporciona información sobre el control del proceso, revelando defectos de sinterización en la superficie de fractura y permitiendo una densificación optimizada para reducir las fuentes de vacío. El análisis composicional revela una alta proporción de hoyuelos en la fase

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



de cobre, lo que resulta en una buena resistencia a la fragilidad del mandril. El análisis de la superficie de fractura proporciona una perspectiva microscópica de los modos de fallo en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno, lo que facilita una comprensión mecanicista de la herramienta mediante estudios morfológicos y contribuye a mejorar la durabilidad del remachado.

#### **5.1.5 Verificación suplementaria de la resistencia a la flexión en las propiedades mecánicas de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno**

La resistencia a la flexión de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se logra principalmente mediante ensayos de flexión de tres o cuatro puntos. Esta verificación ayuda a evaluar la capacidad de carga del mandril y su comportamiento de deformación bajo cargas laterales, proporcionando una referencia adicional para su estabilidad lateral en soportes de remachado. La muestra de prueba es una tira rectangular cortada del mandril, con caras finales paralelas. La máquina de ensayo aplica una carga de flexión, registrando la deflexión y la carga de fractura. Químicamente, el esqueleto de partículas de tungsteno resiste la tensión de flexión, y la fase aglutinante coordina la tensión superficial y la compresión, previniendo la fractura prematura. La curva de flexión muestra deformación plástica después del segmento elástico. La estructura de dos fases del mandril da como resultado una meseta de curva larga, lo que indica una buena tenacidad antes de la fractura.

Se analizó la distribución de tensiones durante el proceso de verificación. Durante la flexión, la capa neutra del mandril se desplazó ligeramente y el gradiente de tensión superficial fue suave. Tras la fractura, se observó la trayectoria de la grieta, que se extendía a lo largo de la fase aglutinante, con partículas de tungsteno formando puentes y retrasando su propagación. El tratamiento térmico verificó el efecto: el recocido mejoró la elongación por flexión y la flexibilidad del mandril. Se verificaron las diferencias de composición: el sistema níquel-cobre mostró una resistencia a la flexión equilibrada, mientras que el sistema níquel-hierro presentó mayor resistencia, pero una flexibilidad ligeramente inferior.

La prueba de resistencia a la flexión valida aún más el rendimiento axial externo del mandril, con la estructura en forma de varilla que simula el impacto lateral. La validación guía el proceso; la resistencia a la flexión se mantiene estable tras la sinterización y la densificación, y la resistencia a la flexión externa aumenta tras el trabajo en caliente y la fibrización. La pureza química afecta la validación, ya que las impurezas reducen la resistencia. La validación de la resistencia a la flexión del mandril proporciona una perspectiva experimental sobre la respuesta lateral, lo que refuerza la comprensión mecánica de la herramienta mediante curvas y superficies de fractura, y aporta una base de validación para el diseño de remachados.

#### **5.2 Tenacidad y comportamiento a la fatiga de las partes superiores de los remaches de aleación de tungsteno**

Los mandriles de remaches de aleación de tungsteno son aspectos importantes de sus propiedades mecánicas. Este comportamiento, manifestado bajo impactos repetidos y cargas cíclicas, ayuda al mandril a mantener la estabilidad del soporte a largo plazo y a prevenir fallos repentinos. La tenacidad

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

incluye la tenacidad al impacto y a la fractura, mientras que el comportamiento a la fatiga se centra en la acumulación de daños y la vida útil. La estructura bifásica de las aleaciones de tungsteno proporciona estos comportamientos: las partículas de tungsteno proporcionan una barrera resistente, mientras que la fase aglutinante absorbe la energía y coordina la deformación. La tenacidad evita la fractura frágil del mandril tras el impacto del remache, mientras que el comportamiento a la fatiga facilita su uso frecuente.

Los mecanismos de comportamiento se manifiestan en daños microscópicos: deslizamiento por maclado de la fase aglutinante durante el impacto y formación de bandas persistentes debido a la acumulación de dislocaciones durante los ciclos de fatiga. El tratamiento térmico optimiza este comportamiento; el recocido libera tensiones y mejora la tenacidad, mientras que los pasadores envejecidos precipitan para mejorar la resistencia a la fatiga. Los ajustes de composición influyen en el comportamiento, lo que resulta en una buena tenacidad en el sistema níquel-cobre y una alta resistencia a la fatiga en el sistema níquel-hierro. Las pruebas de comportamiento guían las aplicaciones: las pruebas de impacto evalúan la absorción de energía y las pruebas de fatiga simulan la vida cíclica. Los mandriles de remache de aleación de tungsteno en herramientas de remachado demuestran durabilidad y fiabilidad, con una deformación mínima del mandril y una calidad de conexión estable. En las aplicaciones, el comportamiento se adapta a las condiciones de trabajo; los mandriles de alta tenacidad se utilizan en entornos vibrantes, mientras que los mandriles resistentes a la fatiga son adecuados para el funcionamiento continuo. La tenacidad y el comportamiento a la fatiga de los mandriles de aleación de tungsteno reflejan la respuesta dinámica de los materiales compuestos, y la optimización del comportamiento favorece la prolongación de la vida útil de la herramienta, proporcionando un rendimiento fiable en la práctica de montaje.

### 5.2.1 Efecto de la tenacidad al impacto en la durabilidad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno

La tenacidad al impacto de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno contribuye principalmente a su capacidad de absorber energía instantánea y resistir daños repentinos. Este efecto se demuestra durante los impactos de martillos de remachado, lo que ayuda al mandril a mantener la integridad estructural y la continuidad del soporte. La tenacidad al impacto se evalúa mediante ensayos Charpy o de martillo de caída. La muestra de mandril presenta una alta absorción de energía en la entalla, donde la fase químicamente aglutinante extiende y puentea la grieta, mientras que las partículas de tungsteno bloquean la trayectoria de propagación. El mecanismo implica una sinergia bifásica: el esqueleto rígido de tungsteno absorbe parte de la energía cinética, mientras que la fase aglutinante se deforma plásticamente y consume el resto, previniendo la fractura frágil.

El proceso de impacto se divide en etapas: absorción elástica en la etapa inicial, deformación plástica en la etapa intermedia y propagación lenta de grietas en la etapa posterior. El tratamiento térmico mejora el efecto; el recocido refina los granos y aumenta la tenacidad, mientras que la precipitación por envejecimiento refuerza los límites. La composición también juega un papel importante; la presencia de una fase de cobre contribuye a una buena tenacidad y asegura una deformación coordinada bajo el impacto del mandril. La tenacidad al impacto guía la durabilidad de los mandriles en el remachado de alta frecuencia, lo que resulta en una buena absorción de energía y una larga vida útil. La tenacidad al

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

impacto proporciona soporte material para cargas dinámicas en la durabilidad del mandril, apoya la adaptación al impacto de la herramienta a través de un mecanismo de absorción y contribuye a la base de la durabilidad en la práctica del remachado.

### 5.2.2 Aplicación del análisis de fatiga cíclica en remaches de aleación de tungsteno

El análisis de fatiga cíclica en mandriles de remaches de aleación de tungsteno consiste principalmente en simular la acumulación de daños y el comportamiento de falla bajo cargas repetidas. Este análisis ayuda a comprender la durabilidad del mandril en entornos de remachado de alta frecuencia y guía la optimización del material para aumentar su vida útil. El análisis de fatiga cíclica generalmente emplea ensayos de flexión rotatoria o de tensión/compresión axial, colocando la muestra del mandril en un campo de tensión periódico y registrando el número de ciclos y la evolución del daño. Químicamente, la fase aglutinante coordina la microtensión durante los ciclos, mientras que el esqueleto de partículas de tungsteno resiste la propagación de grietas por fatiga. El proceso de análisis se realiza en etapas: primero, se evalúa un umbral de baja tensión y luego se observa el daño acelerado por alta tensión. La estructura bifásica del mandril resulta en una curva de fatiga en forma de SN más suave, con inicio del daño en la superficie o interfaz.

En las aplicaciones, el análisis de fatiga cíclica revela el mecanismo de fatiga del mandril. Inicialmente, la acumulación de dislocaciones forma una banda persistente; en la etapa intermedia, se inician microfisuras en la fase aglutinante; y en la etapa posterior, la propagación a través de partículas de tungsteno provoca la fractura. La optimización del tratamiento térmico durante el análisis muestra que el recocido reduce la tensión residual y aumenta el umbral de fatiga. Las diferencias en la composición indican que el sistema níquel-cobre presenta una buena tenacidad a la fatiga, pero presenta trayectorias de grietas por flexión bajo cargas cíclicas; el sistema níquel-hierro tiene alta resistencia, pero es ligeramente más susceptible a la fatiga. El análisis guía el diseño del mandril; el pulido superficial reduce los puntos de inicio, lo que resulta en mandriles con una alta resistencia a las cargas cíclicas.

El análisis de fatiga cíclica también incorpora la observación de la superficie de fractura, y la microscopía electrónica de barrido revela estrías de fatiga y planos de clivaje. El análisis de la trayectoria de daño del mandril optimiza la microestructura. El análisis de control de deformación evalúa la fatiga de bajo ciclo, revelando una deformación mínima del mandril y una larga vida útil en el remachado de alta frecuencia. El análisis incluye factores ambientales, como la corrosión acelera la fatiga, mientras que el recubrimiento del mandril proporciona protección. La aplicación del análisis de fatiga cíclica en mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una perspectiva experimental para la predicción de la vida útil, facilita la optimización de la durabilidad de la herramienta mediante estudios de daños y contribuye a la comprensión mecanicista en la práctica del remachado.

El análisis sistemático garantiza una fatiga constante en todos los lotes de mandriles, lo que permite ajustar los parámetros de sinterización según la retroalimentación de la producción. El comportamiento a la fatiga de las aleaciones de tungsteno se caracteriza por la sinergia de fases: la fase aglutinante absorbe la energía cíclica, mientras que la fase de tungsteno previene el agrietamiento. Las aplicaciones se

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

extienden al software de simulación, donde el análisis de elementos finitos predice los puntos críticos de fatiga y la optimización de la forma del mandril reduce la concentración de tensiones. El análisis de fatiga cíclica para mandriles de remaches de aleaciones de tungsteno proporciona una evaluación dinámica para la ingeniería de materiales, lo que permite gestionar la vida útil de las herramientas mediante la respuesta cíclica y demuestra su valor práctico en el sector del ensamblaje.

### 5.2.3 Método para medir la tenacidad a la fractura en mandriles de remaches de aleación de tungsteno

Las mediciones de tenacidad a la fractura en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se obtienen principalmente mediante ensayos de flexión de tres puntos o ensayos de tracción compacta en muestras prefijadas. Este método ayuda a evaluar la resistencia del mandril a la propagación de grietas en presencia de grietas, lo que guía la resistencia a la fractura del material en soportes de impacto. La muestra de prueba es una tira o disco rectangular cortado del mandril, con una prefisura introducida para simular el daño real. Se aplican cargas de flexión o tracción mediante una máquina de ensayo y se registra la curva de propagación de grietas. La fase químicamente enlazada puentea la grieta y las partículas de tungsteno bloquean el paso. La curva muestra el pico de carga y el segmento de propagación estable.

El proceso de medición incluye la preparación previa a la fisura, el ciclado por fatiga o entallado para introducir una fisura en la punta, y un mandril con estructura bifásica para iniciar la fisura en la fase aglutinante. Los ensayos de flexión implican sujetar la muestra por ambos extremos y aplicar una carga en el centro; se mide el desplazamiento de la abertura de la fisura para calcular los parámetros de tenacidad. Un método de tracción compacto estira ambos extremos de la muestra, con abrazaderas que fijan la zona de la fisura; cuando el mandril presenta buena tenacidad, la propagación de la fisura es lenta. El entorno de ensayo se controla a temperatura ambiente; se utilizan variantes de alta temperatura para evaluar la tenacidad a la fractura térmica.

Los métodos de medición de la tenacidad a la fractura revelan el mecanismo de la varilla de empuje: las grietas se propagan a lo largo de la fase aglutinante y la formación de hoyuelos en el grano de tungsteno retrasa su propagación. Las mediciones del tratamiento térmico muestran que el recocido mejora la tenacidad y que la trayectoria de fractura de la varilla de empuje se vuelve más flexural. Las diferencias de composición revelan que el sistema níquel-cobre presenta alta tenacidad y mayor capacidad de puenteo de grietas; el níquel-hierro presenta alta resistencia mecánica, pero tenacidad moderada. Las mediciones guían el proceso: la sinterización densifica la estructura, lo que resulta en una tenacidad estable; el trabajo en caliente y el tratamiento fibroso aumentan la tenacidad a la flexión.

La medición de la tenacidad a la fractura en mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una perspectiva experimental sobre la resistencia al agrietamiento, refuerza la comprensión de la tenacidad de las herramientas mediante un análisis extenso y aporta una base de evaluación para el diseño de remachados. La aplicación sistemática de la medición garantiza una tenacidad consistente en todos los lotes de mandriles, lo que permite ajustar los parámetros según la retroalimentación de la producción. El comportamiento de fractura de las aleaciones de tungsteno se demuestra en la medición como sinergia

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



de fases, donde la fase aglutinante crea energía de puenteo y la fase de tungsteno dificulta la propagación. Las aplicaciones se extienden al software de simulación, donde el análisis de elementos finitos predice los puntos críticos de tenacidad y la optimización de la forma del mandril reduce la susceptibilidad al agrietamiento. La evaluación de mandriles de remaches de aleación de tungsteno mediante la medición de la tenacidad a la fractura proporciona una evaluación de daños para la ingeniería de materiales, permite la gestión de la tenacidad de las herramientas mediante la respuesta de la medición y demuestra un valor práctico en el campo del ensamblaje. La profundidad del análisis permite predecir la tenacidad del mandril en condiciones de alta carga, lo que promueve una mayor seguridad en el uso.

#### **5.2.4 Predicción de la vida útil de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno debido a la fatiga de alto ciclo**

La fatiga de alto ciclo en la vida útil de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se calcula principalmente mediante curvas SN y modelos de acumulación de daños. Esta predicción ayuda a analizar la durabilidad del mandril bajo baja tensión y alta carga cíclica, lo que orienta la evaluación de la vida útil de la herramienta en entornos de remachado de alta frecuencia. La fatiga de alto ciclo se refiere a la condición en la que la tensión es inferior al límite elástico, pero el número de ciclos es elevado. Las muestras de mandril se prueban en máquinas de flexión rotatoria o de tensión/compresión axial, y se registran el número de ciclos y el comportamiento de falla. La fase aglutinante coordina los microdaños en la fatiga de alto ciclo, y el esqueleto de partículas de tungsteno resiste la propagación de grietas.

El método de predicción implica el trazado de curvas SN y la comprobación de la vida útil a múltiples niveles de tensión. La estructura bifásica del mandril resulta en una pendiente más suave de la curva y un límite de fatiga más alto. Los modelos de acumulación de daños, como la regla de Miner, integran cargas variables para predecir la vida útil en condiciones reales de operación. La predicción de la fatiga de alto ciclo del mandril considera el estado de la superficie; el pulido reduce el punto de partida y prolonga la vida útil. El tratamiento térmico también se considera en el proceso de predicción; el recocido reduce la tensión residual y aumenta el límite de fatiga.

La predicción de fatiga de alto ciclo revela el mecanismo de la barra superior: el microdaño comienza con la acumulación de dislocaciones, seguido de la iniciación y propagación de grietas en el límite de grano, lo que conduce a la falla. Las diferencias de composición en la predicción muestran que el sistema níquel-cobre presenta una buena tenacidad de alto ciclo y un daño lento bajo ciclos; los sistemas níquel-hierro ofrecen alta resistencia, pero límites de fatiga moderados. La guía predictiva se aplica a las siguientes aplicaciones: el remachado manual prioriza la resistencia de bajo ciclo, mientras que los sistemas neumáticos de alta frecuencia se centran en la vida útil de alto ciclo. La gestión de la pureza química minimiza las impurezas y reduce la iniciación de daños de alto ciclo.

El análisis proporciona una perspectiva matemática sobre la respuesta cíclica para predecir la vida útil de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno. El análisis de modelos respalda la comprensión de la vida útil de la herramienta y aporta una base predictiva al diseño de remachado. La aplicación sistemática de las predicciones garantiza una vida útil constante de los lotes de mandriles, lo que permite

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



la retroalimentación de la producción para ajustar los parámetros de sinterización. El comportamiento de alto ciclo de las aleaciones de tungsteno se refleja en la predicción como un efecto sinérgico, con la fase aglutinante absorbiendo la energía cíclica y la fase de tungsteno previniendo daños. La predicción de fatiga de alto ciclo proporciona un modelo dinámico para evaluar la vida útil de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno, lo que permite la gestión de la vida útil de la herramienta a través de la respuesta prevista y demuestra un valor práctico en el ensamblaje. La profundidad del análisis permite la previsibilidad de la vida útil del mandril en funcionamiento continuo, lo que impulsa la optimización de los planes de mantenimiento.

### 5.3 Características de fricción y desgaste de las partes superiores de los remaches de aleación de tungsteno

Los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se basan principalmente en la interacción de contacto entre su superficie y la cola del remache. Estas características influyen en la tasa de daño superficial y la durabilidad general del mandril durante el remachado. Las características de fricción se relacionan con la resistencia al deslizamiento entre las superficies de contacto, mientras que las características de desgaste describen el proceso de eliminación de material. La estructura bifásica de las aleaciones de tungsteno da como resultado una superficie lisa con baja fricción y una fase dura que resiste los arañazos durante el desgaste lento. El análisis de características ayuda a optimizar la estabilidad del mandril durante el uso repetido y reduce la acumulación de picaduras en la superficie.

El mecanismo de fricción y desgaste se manifiesta en la superficie de trabajo del mandril. La alta dureza de las partículas de tungsteno reduce el desgaste incrustado, mientras que la tenacidad de la fase aglutinante reduce la adhesión. La fricción aumenta cuando se forma una capa de óxido químico en la superficie y sus propiedades mejoran tras la eliminación del pulido. Las pruebas de características guían la selección del material; un bajo coeficiente de fricción garantiza una deformación suave del remache, lo que resulta en una baja tasa de desgaste y una larga vida útil. Las características de fricción y desgaste de los mandriles de remache de aleación de tungsteno reflejan la respuesta superficial de los materiales compuestos. El control de características mejora la durabilidad de la herramienta y proporciona una base sólida para la práctica del remachado.

#### 5.3.1 Optimización de la varilla superior del remache de aleación de tungsteno basada en la medición del coeficiente de fricción

La medición del coeficiente de fricción de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se realiza principalmente mediante pruebas de fricción por deslizamiento. Esta medición permite evaluar la resistencia de la superficie del mandril al contacto con el remache, lo que orienta el tratamiento superficial y el ajuste de la composición para reducir la fricción y mejorar la eficiencia del remachado. Para la medición se suele utilizar un aparato de disco de pasador o de disco de bola. La muestra del mandril se fija como disco y se aplica una carga al pasador de rectificado mientras se desliza. Se registra la relación entre la fuerza de fricción y la fuerza normal. Químicamente, se mide el coeficiente de influencia de la humectación selectiva, que es bajo después del pulido.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Se optimizaron las curvas de medición del análisis del proceso. Se añadió lubricación cuando el coeficiente de fricción en seco era alto y se evaluó el efecto del refrigerante durante la fricción en húmedo. La fase de tungsteno en el expulsor presenta una dureza alta y un coeficiente bajo; una mayor proporción de la fase aglutinante resulta en una mejor plasticidad y una fricción más estable. Las variaciones de medición incluyeron la fricción a alta temperatura, simulando condiciones de remachado en caliente, y el aumento del coeficiente durante la formación de la capa de óxido del expulsor, que se mitigó mediante la protección del recubrimiento. La aplicación de la medición del coeficiente de fricción para la optimización del expulsor se refleja en el control de producción; cuando el coeficiente es alto, se ajusta la textura de la superficie y el trefilado reduce la fricción especular.

La medición de la composición guía muestra que la fase de cobre tiene un coeficiente alto y un coeficiente de fricción bajo, lo que resulta en una deformación más suave del mandril. Se miden los cambios en el coeficiente tras el tratamiento térmico, lo que indica una superficie de fricción limpia y estable tras el recocido. La medición del coeficiente de fricción proporciona un enfoque cuantitativo para optimizar la interacción superficial de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno, facilita el control de la fricción de la herramienta mediante el análisis de la relación de fuerzas y contribuye a mejorar la eficiencia en las operaciones de remachado.

### **5.3.2 Discusión sobre el mecanismo de desgaste en las barras superiores de remaches de aleación de tungsteno**

El estudio de los mecanismos de desgaste en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se centra principalmente en el desgaste adhesivo, el desgaste abrasivo y el desgaste por fatiga. Esta investigación ayuda a comprender el proceso de eliminación de material en la superficie de trabajo del mandril bajo contacto con el remache, lo que orienta el diseño de sistemas resistentes al desgaste y las estrategias de mantenimiento. El desgaste adhesivo se origina por el ablandamiento y la transferencia de la fase aglutinante al remache durante el contacto a alta temperatura, seguido de una reacción química interfacial que forma una capa adhesiva, lo que provoca la acumulación de picaduras en la superficie del mandril. El desgaste abrasivo se manifiesta en remaches duros, donde las partículas incrustadas rayan la fase de tungsteno, lo que provoca la formación de ranuras en la superficie del mandril.

El desgaste por fatiga se manifiesta bajo impactos repetidos, con microvibraciones que provocan el desprendimiento de la capa superficial y la propagación de grietas por fatiga en la fase adherida del mandril. La exploración del mecanismo se realizó mediante simulaciones de pruebas de desgaste, registrando la pérdida de volumen bajo carga y condiciones de deslizamiento utilizando un dispositivo de disco de pasador y observando la morfología mediante microscopía electrónica de barrido. Se observó desgaste por oxidación química, acompañado de una eliminación acelerada de la capa superficial debido a la porosidad. Los hallazgos guían la optimización, incluido el endurecimiento de la superficie para reducir la adhesión, el recubrimiento para proteger contra partículas abrasivas y el tratamiento térmico para mejorar la resistencia a la fatiga. La exploración del mecanismo de desgaste en mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una comprensión material de la trayectoria del daño,

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

respalda la mejora de la resistencia al desgaste de la herramienta a través del análisis de tipos y contribuye con conocimientos mecanísticos a la práctica del remachado.

### 5.3.3 Análisis del desgaste abrasivo en el daño superficial de las varillas de remache de aleación de tungsteno

El desgaste abrasivo en la superficie dañada de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se centra principalmente en los efectos de corte y rayado de las partículas duras durante el contacto. Este análisis ayuda a comprender el mecanismo de cambio de la superficie del mandril al remachar remaches duros o en entornos que contienen impurezas. El desgaste abrasivo se origina por la incrustación de colas o fragmentos de remache en la superficie de trabajo del mandril. Durante el movimiento relativo, las partículas aran ranuras o microcortes en la superficie. Químicamente, las partículas de tungsteno tienen alta dureza y resisten el corte, mientras que la fase de unión es relativamente blanda y forma ranuras fácilmente. En las primeras etapas del daño, aparecen finos arañazos y, con la acción continua, las ranuras se profundizan y la rugosidad de la superficie aumenta.

El proceso de análisis se simuló mediante pruebas de desgaste, donde la muestra de la varilla de empuje se deslizó contra el medio abrasivo, registrándose la pérdida de volumen y los cambios morfológicos. Se utilizó microscopía electrónica de barrido (MEB) para observar la morfología de la ranura; la superficie de la fase de tungsteno mostró arañazos superficiales, mientras que la fase aglutinante presentó surcos profundos. El mecanismo de daño se dividió en etapas: el micromecanizado inicial eliminó una pequeña cantidad de material, se observó desprendimiento por fatiga en la etapa intermedia y, posteriormente, acumulación de ranuras que afectó la adhesión. El análisis del tratamiento térmico reveló la influencia del mismo; el recocido mejoró la tenacidad de la fase aglutinante, reduciendo el desprendimiento, mientras que el endurecimiento por envejecimiento disminuyó la profundidad de la ranura.

El análisis del desgaste abrasivo también considera las condiciones de trabajo; el remachado a alta velocidad resulta en una alta energía cinética abrasiva y un daño rápido, mientras que la fricción continua a baja velocidad produce ranuras largas. El análisis del tratamiento superficial también es importante; los recubrimientos o capas endurecidas amortiguan las partículas abrasivas, ralentizando así el daño al mandril. La gestión de la pureza química minimiza las impurezas y reduce las partículas abrasivas autogeneradas. El análisis del desgaste abrasivo en el daño superficial de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una respuesta del material al entorno de fricción, y los estudios morfológicos respaldan la optimización de la resistencia al desgaste de la herramienta, lo que contribuye a la comprensión del daño en la práctica del remachado.

### 5.3.4 Comportamiento durante el proceso de contacto del remachador de aleación de tungsteno

El desgaste adhesivo en el proceso de contacto de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno implica principalmente la transferencia de material superficial a alta temperatura o presión. Esto provoca una adhesión localizada entre el mandril y la cola del remache, lo que afecta la separación y la integridad de la superficie. El desgaste adhesivo se origina por el ablandamiento instantáneo de la superficie de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contacto a alta temperatura. Químicamente, la fase aglutinante, con su punto de fusión más bajo, se ablanda primero, formando microsoldaduras con el material del remache. Durante el deslizamiento relativo, estas soldaduras se rompen, transfiriendo material al lado opuesto. Inicialmente, se manifiesta como puntos rugosos en la superficie; con la acción continua, se forman picaduras o protuberancias que reducen el acabado superficial de la superficie de trabajo del mandril.

El mecanismo se manifiesta en la interfaz: la acumulación de calor por fricción provoca un aumento localizado de la temperatura, lo que provoca que la fase aglutinante fluya y se adhiera al remache; al enfriarse, el punto de unión se solidifica. La fractura por cizallamiento deslizante se produce en el punto de unión, lo que provoca el desprendimiento del material del mandril o su adhesión al remache. La alta dureza de las partículas de tungsteno reduce el inicio de la adhesión y la tendencia a la adhesión al mandril. Una alta conductividad térmica produce una rápida difusión térmica, una rápida caída de la temperatura en el punto de unión y una menor transferencia.

El desgaste adhesivo también se ve afectado por la carga: la alta presión produce un contacto firme y una fuerte adhesión, mientras que la baja presión facilita la separación. Los tratamientos superficiales también influyen: el pulido reduce la adhesión inicial y los recubrimientos aíslan y reducen las reacciones. Una buena estabilidad química también es importante: una fina capa de óxido en el mandril ralentiza la adhesión. El rendimiento del desgaste adhesivo de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno durante el contacto refleja la interacción del material durante la fricción a alta temperatura. El análisis de transferencia facilita la gestión de la superficie de la herramienta y proporciona una referencia de rendimiento para las operaciones de remachado.



CTIA GROUP LTD Varilla superior con remache de aleación de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## CTIA GROUP LTD

### 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/cm<sup>3</sup>), 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

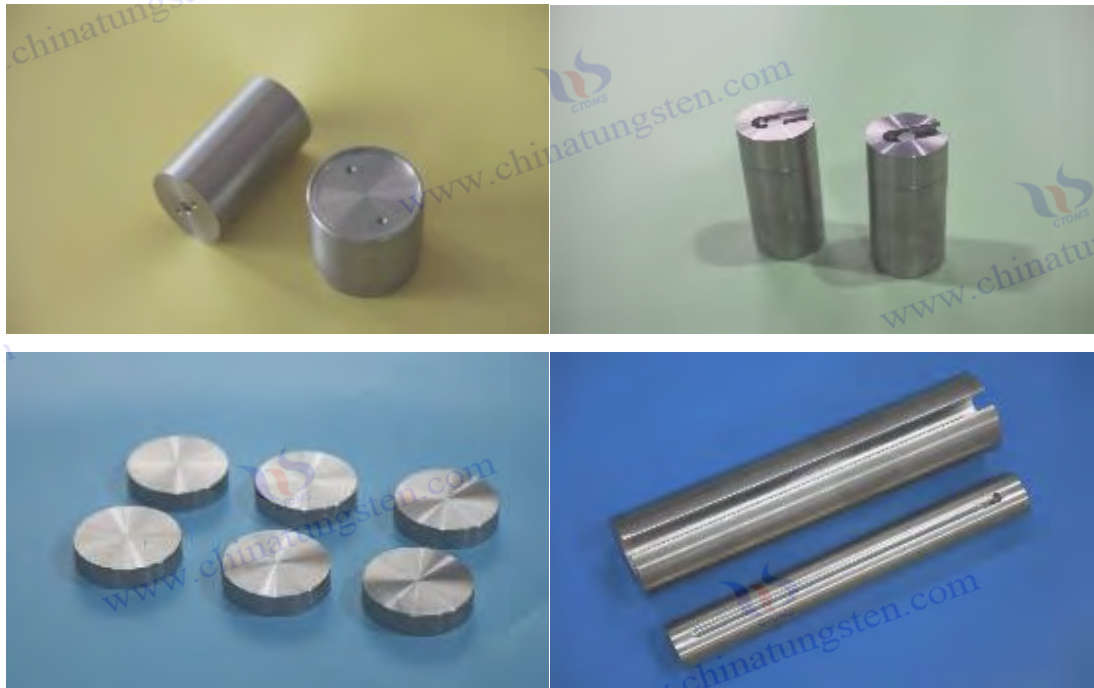
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Capítulo 6 Corrosión y durabilidad de los pasadores de remache de aleación de tungsteno

### 6.1 Comportamiento de corrosión electroquímica de las partes superiores de remaches de aleación de tungsteno

Los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se ven afectados principalmente por su estructura bifásica y el medio ambiente. Este comportamiento es especialmente pronunciado en entornos húmedos o sometidos a limpieza química, lo que afecta la estabilidad superficial y el rendimiento a largo plazo del mandril. La corrosión electroquímica implica disolución anódica y reducción catódica. La fase de tungsteno es químicamente inerte, mientras que las fases aglutinantes, como el níquel o el cobre, son altamente reactivas y se convierten fácilmente en puntos de inicio de la corrosión. Se realizó un análisis de comportamiento mediante curvas de polarización y espectroscopia de impedancia. El barrido de potencial del mandril en el electrolito reveló cambios en el potencial de corrosión y la densidad de corriente.

El comportamiento corrosivo también incluye picaduras y tendencia a la corrosión uniforme; la fase aglutinante se disuelve preferentemente para formar microceldas, y la corrosión es lenta tras la exposición de las partículas de tungsteno. Presenta buena estabilidad química, autopasivante en la atmósfera y formando una fina capa protectora sobre la superficie. El entorno influye en el comportamiento; los entornos ácidos aceleran la disolución de la fase aglutinante, mientras que los entornos neutros o alcalinos son relativamente suaves. El comportamiento corrosivo electroquímico de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno refleja la respuesta electroquímica de los materiales compuestos. Este estudio de comportamiento facilita la optimización de la resistencia a la corrosión de las herramientas y proporciona una referencia de adaptación ambiental para el mantenimiento de los remachados.

#### 6.1.1 Aplicación de curvas de polarización en el estudio de la corrosión de mandriles de remaches de aleación de tungsteno

La aplicación de curvas de polarización en el estudio de la corrosión de mandriles de remaches de aleación de tungsteno se logra principalmente mediante el escaneo de potencial dinámico. Este método ayuda a evaluar el potencial de corrosión, el rango de pasivación y la densidad de corriente de corrosión del mandril en el electrolito, guiando las mejoras en la resistencia a la corrosión. La prueba utiliza la muestra del mandril como electrodo de trabajo, sumergiéndola en un medio simulado en un sistema de tres electrodos. El escaneo de potencial registra la respuesta de la corriente; químicamente, la rama anódica refleja el comportamiento de disolución y la rama catódica refleja el proceso de reducción. Las curvas muestran el potencial de corrosión y la meseta de pasivación, con un aumento de la corriente en la región activa de la fase aglutinante y una baja corriente de pasivación en la fase de tungsteno.

Durante el proceso, las superficies de las muestras se pulieron uniformemente y el entorno se simuló con medios como soluciones de cloruro de sodio o ácido sulfúrico. Se emplearon curvas de polarización para diferenciar los tipos de corrosión; se observó una alta sensibilidad cuando el potencial de ruptura por picaduras era bajo, y se observó una meseta amplia tras el recubrimiento de la varilla superior. Se empleó

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la extrapolación de Tafel para cuantificar la velocidad de corrosión; esta aumentó cuando la proporción de fase adhesiva en la varilla superior fue alta. Se utilizó un escaneo dinámico para observar la repasivación, lo que reveló una alta capacidad de recuperación de la varilla superior tras el daño.

Las curvas de polarización también se utilizaron para evaluar el efecto del tratamiento térmico en el estudio. El recocido amplió el rango de pasivación, lo que resultó en una mejor resistencia a la corrosión localizada en el mandril. Las diferencias en la composición mostraron una pasivación estable en el sistema tungsteno-cobre, mientras que las propiedades magnéticas del níquel-hierro no afectaron directamente las curvas. Al comparar las curvas en diferentes medios, el mandril se corroyó rápidamente en ácidos y mostró una fuerte pasivación en álcalis. El uso de curvas de polarización en el estudio de la corrosión de mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una perspectiva experimental sobre los parámetros electroquímicos. El análisis de curvas facilita la comprensión de la resistencia a la corrosión de las herramientas y aporta un método de evaluación para las prácticas de mantenimiento.

### 6.1.2 protege las barras superiores de remaches de aleación de tungsteno

La formación de una capa de pasivación en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se logra principalmente mediante la formación de películas de óxido espontáneas o artificiales sobre la superficie. Esta protección reduce la velocidad de corrosión del mandril en ambientes húmedos o con agentes de limpieza, manteniendo la suavidad de la superficie y la estabilidad funcional. La capa de pasivación se forma de forma natural en aire o medios neutros, donde la fase de tungsteno forma una densa capa de óxido, y el níquel o el cobre también participan como fases aglutinantes. Químicamente, esta fina capa bloquea la difusión de oxígeno y la migración de iones. El mecanismo de protección se manifiesta electroquímicamente: la capa de pasivación aumenta el potencial de corrosión y reduce la corriente de anolito.

El proceso de formación se ve influenciado por el entorno, con una pasivación lenta en la atmósfera y un espesamiento acelerado mediante un tratamiento anódico electroquímico. Tras pulir la varilla superior, la pasivación es rápida, pero la capa superficial rugosa es porosa y ofrece poca protección. El tratamiento térmico promueve la formación, y el recocido controla el contenido de oxígeno para garantizar la uniformidad en la capa inferior. El efecto protector se refleja en la resistencia a la corrosión por picaduras; la capa de pasivación tiene un alto potencial de ruptura, y la varilla superior sufre menos daños localizados.

La capa de pasivación protege el mandril, incluyendo su estabilidad mecánica. Su fina capa presenta una fuerte adhesión, lo que la hace resistente al desprendimiento durante la fricción del remachado. Tras la limpieza química, la capa se regenera, lo que resulta en una buena durabilidad del mandril. La composición influye en la formación; la capa de pasivación de la fase de cobre proporciona conductividad eléctrica, mientras que la capa de fase de níquel es densa. La protección que la capa de pasivación proporciona al mandril de remache de aleación de tungsteno demuestra el efecto barrera de la química superficial, reforzando la resistencia a la corrosión de la herramienta mediante la estabilidad de la capa y proporcionando una base duradera en entornos de remachado.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 6.1.2.1 Estabilidad de las barras superiores de remaches de aleación de tungsteno en entornos ácidos

Los mandriles de remaches de aleación de tungsteno en entornos ácidos se ven afectados principalmente por el valor de pH y el tipo de ion del medio. Esta estabilidad es especialmente evidente en talleres de limpieza o de neblina ácida, donde el comportamiento de la capa de pasivación sobre la superficie del mandril determina la velocidad de corrosión. Las condiciones ácidas activan la disolución de la fase aglutinante, y los elementos de níquel o cobre forman iones solubles con facilidad. Si bien la fase de tungsteno es químicamente relativamente inerte, las microceldas en la interfaz aceleran la corrosión localizada. La estabilidad general del mandril depende del espesor de la capa de pasivación; una capa superficial pulida más delgada reduce ligeramente la estabilidad, mientras que la erosión ácida se ralentiza después del recubrimiento o el tratamiento de prepasivación.

interacción bifásica : la fase aglutinante reacciona y consume preferentemente iones de hidrógeno; tras la exposición de las partículas de tungsteno, la capa de óxido superficial se regenera; y la morfología de corrosión del mandril tiende a ser uniforme en lugar de presentar picaduras profundas. Una mayor concentración de ácido disminuye la estabilidad, pero el sistema de aleación de tungsteno exhibe una relativa estabilidad en ácidos diluidos, y la superficie lisa del mandril se mantiene durante un largo tiempo. El tratamiento térmico afecta la estabilidad; el recocido da como resultado una microestructura uniforme, pero una penetración ácida lenta. Los ajustes de composición mejoran la estabilidad; una fase con mayor contenido de cobre promueve la conductividad, pero conduce a una disolución ácida más rápida, mientras que la fase de níquel ofrece una resistencia ácida ligeramente mejor.

Se puede restaurar con un paño después de la inmersión. El tratamiento superficial mejora la estabilidad; la pasivación química forma una capa gruesa que minimiza la corrosión en presencia de niebla ácida. Las pruebas de inmersión evalúan la estabilidad; un cambio mínimo en la masa del mandril indica una buena resistencia a los ácidos. La estabilidad del mandril de remache de aleación de tungsteno en entornos ácidos demuestra la adaptabilidad del material compuesto a los medios. La capa protectora facilita el mantenimiento de la superficie de la herramienta, lo que contribuye a su durabilidad en operaciones con ácidos.

#### 6.1.2.2 Respuesta del mandril de remache de aleación de tungsteno en condiciones alcalinas

Los mandriles de remaches de aleación de tungsteno en condiciones alcalinas presentan principalmente una pasivación superficial mejorada y un ligero comportamiento de disolución. Esta respuesta se observa en entornos de lavado alcalino o refrigerante alcalino, y el mandril exhibe una buena estabilidad general. Los medios alcalinos promueven la formación de óxidos estables en la superficie de la fase de tungsteno. Químicamente, las fases aglutinantes, níquel o cobre, tienen baja solubilidad en álcali, lo que resulta en una velocidad de corrosión lenta para el mandril. En la etapa inicial de la respuesta, la capa de pasivación superficial se espesa, evitando reacciones posteriores y manteniendo la suavidad del mandril. El mecanismo de respuesta se manifiesta en la selectividad de fase: las partículas de tungsteno son altamente inertes en álcali, la fase aglutinante reacciona ligeramente para formar un precipitado protector y la capa

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

superficial de la varilla superior es densa. La respuesta cambia poco con el aumento de la concentración de álcali, y la varilla superior exhibe una corrosión uniforme en lugar de picaduras. El tratamiento térmico afecta la respuesta; el recocido da como resultado límites de grano más limpios y una menor penetración de álcali. Las diferencias de composición conducen a una mejor pasivación de la fase de níquel en el álcali, mientras que la fase de cobre es ligeramente más activa pero generalmente estable.

La respuesta del expulsor en condiciones alcalinas es adecuada para el mantenimiento con lavado alcalino, y la superficie no presenta daños significativos tras la inmersión. El pretratamiento de la superficie mejora la respuesta, y una gruesa capa de pasivación garantiza la estabilidad del expulsor en condiciones de niebla alcalina. La evaluación de la respuesta mediante pruebas de inmersión alcalina muestra un cambio morfológico mínimo, lo que indica una buena adaptabilidad. La respuesta del expulsor de remaches de aleación de tungsteno en condiciones alcalinas refleja la adaptabilidad del material a la alcalinidad, lo que mejora la tolerancia a la limpieza de la herramienta mediante pasivación y proporciona una base superficial para operaciones alcalinas.

### **6.1.3 Caracterización de mandriles de remaches de aleación de tungsteno mediante medición del potencial de corrosión**

La medición del potencial de corrosión en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se realiza principalmente mediante el potencial de circuito abierto y el escaneo potenciodinámico. Esta caracterización ayuda a evaluar la estabilidad termodinámica del mandril en el medio y orienta la determinación de la resistencia a la corrosión. La muestra del mandril se sumerge en un electrolito y se registra el potencial estable. Químicamente, un potencial alto indica una fuerte tendencia a la pasivación y dificultad para iniciar la corrosión. El potencial de circuito abierto se estabiliza con el tiempo, y el potencial de la estructura bifásica del mandril se encuentra entre el del tungsteno y el del aglutinante.

El proceso de caracterización implicó una comparación multimedio: un potencial bajo en medios ácidos favoreció la corrosión, mientras que un potencial alto en medios alcalinos resultó en una pasivación estable. El escaneo dinámico de potencial amplió el proceso de caracterización, revelando que el punto de corriente cero representa el potencial de corrosión, y que la varilla de empuje presentó un amplio rango de pasivación y buena resistencia a la corrosión. El estado de la superficie se midió como factor limitante; el pulido resultó en un potencial alto, mientras que la rugosidad causó fluctuaciones de potencial. La caracterización por tratamiento térmico mostró que el recocido aumentó el potencial y resultó en una microestructura más uniforme.

La medición del potencial de corrosión caracteriza la adaptabilidad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno a diversas aplicaciones; potenciales más altos resultan en mandriles más estables en ambientes húmedos. También se consideran las diferencias de composición: los mandriles de tungsteno-cobre presentan potenciales moderados, mientras que los mandriles de níquel-hierro muestran potenciales ligeramente más bajos, pero una pasivación más fuerte. Las mediciones orientan las medidas de protección; potenciales más bajos mejoran el rendimiento del recubrimiento. La medición del potencial de corrosión proporciona una perspectiva experimental sobre la estabilidad electroquímica de

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

los mandriles de remaches de aleación de tungsteno, respalda la evaluación de la corrosión de las herramientas mediante el análisis de potencial y aporta una base de caracterización para la durabilidad ambiental.

#### 6.1.4 Aplicación del análisis de espectroscopia de impedancia en la cinética de corrosión de mandriles de remaches de aleación de tungsteno

La aplicación de la espectroscopia de impedancia en la cinética de corrosión de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se logra principalmente mediante la medición de impedancia de CA. Esta aplicación ayuda a revelar las reacciones interfaciales y los cambios en la velocidad de corrosión del mandril en el electrolito, lo que guía la evaluación y la mejora de la resistencia a la corrosión. La espectroscopia de impedancia implica aplicar una pequeña señal de CA, registrar la curva de respuesta en frecuencia y ajustar un modelo de circuito equivalente. Químicamente, la capa de pasivación en la superficie del mandril se comporta como un elemento capacitivo-resistivo, y la disolución de la fase aglutinante corresponde a la resistencia de transferencia. En el proceso de aplicación, la muestra del mandril se utiliza como electrodo de trabajo, sumergida en un medio simulado, y la frecuencia se escanea de alta a baja. La forma de arco de la curva refleja la integridad de la capa de pasivación.

En las aplicaciones, el análisis por espectroscopia de impedancia distingue las etapas de corrosión: un arco inicial amplio indica una pasivación estable, mientras que un arco más pequeño, con el tiempo, acelera la corrosión. La estructura bifásica del mandril es evidente en el análisis: la fase de tungsteno presenta una alta impedancia y la fase aglutinante está controlada por difusión de baja frecuencia. El ajuste de circuitos equivalentes parametriza el proceso, cuantificando el comportamiento interfacial mediante la resistencia del electrolito, la capacitancia de doble capa y la resistencia de transferencia, de las cuales se deriva la cinética de corrosión del mandril. El análisis guía el tratamiento térmico; tras el recocido, el arco de impedancia aumenta, la microestructura se vuelve más uniforme y la resistencia a la corrosión mejora. Dependiendo de la composición, el sistema tungsteno-cobre presenta una alta impedancia y una pasivación estable, mientras que el sistema níquel-hierro presenta una impedancia ligeramente menor, pero se recupera más rápido.

El análisis de espectroscopia de impedancia también evalúa la efectividad del tratamiento de la superficie; el cambio en la forma del arco después del recubrimiento refleja la contribución de la capa protectora. El análisis de la influencia del medio revela que la baja impedancia en ácidos conduce a una corrosión rápida, mientras que un arco grande en álcalis promueve una pasivación fuerte. Las aplicaciones se extienden al monitoreo dinámico; la curva de impedancia variable en el tiempo del mandril después de una inmersión a largo plazo predice su vida útil. La gestión de la pureza química garantiza menos impurezas, lo que resulta en un arco de impedancia claro y sin interferencias. La aplicación de la espectroscopia de impedancia en la cinética de la corrosión de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una perspectiva del dominio de la frecuencia en la dinámica interfacial, respalda la comprensión de los mecanismos de corrosión de las herramientas a través del ajuste de curvas y contribuye con métodos analíticos a la durabilidad ambiental.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 6.1.5 Comportamiento de corrosión de la reacción de oxidación en barras superiores de remaches de aleación de tungsteno

La oxidación de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno implica principalmente cambios superficiales relacionados con el oxígeno atmosférico o del medio circundante. Este comportamiento se manifiesta cuando el mandril se expone al aire o a altas temperaturas, lo que afecta su estabilidad superficial y su vida útil. La reacción de oxidación comienza con la adsorción de moléculas de oxígeno en la superficie del mandril. Los elementos de la fase de unión química, como el níquel o el cobre, se oxidan primero para formar una capa delgada, mientras que la fase de tungsteno forma óxidos lentamente. El comportamiento corrosivo del mandril tiende a moderarse tras la formación de la capa de óxido. Una capa gruesa dificulta la difusión del oxígeno, pero la corrosión se acelera cuando la capa es porosa.

El mecanismo de comportamiento se manifiesta en la selectividad de fase: la oxidación de la fase aglutinante consume preferentemente oxígeno, generando óxido de níquel u óxido de cobre, mientras que la oxidación de la fase de tungsteno forma una capa densa, y el comportamiento general del mandril cambia de oxidación rápida a estabilidad de pasivación. La alta temperatura acelera la reacción; cuando el mandril se calienta por fricción, se forma una gruesa capa local de óxido, lo que resulta en cambios en el color de la superficie. La humedad en el medio participa en la oxidación, lo que hace que el comportamiento sea más activo en ambientes húmedos, y la capa de hidrato en la superficie del mandril aumenta la tendencia a la corrosión. La influencia de la reacción de oxidación en el comportamiento de corrosión del mandril guía la protección; la prepasivación forma una capa uniforme, lo que resulta en un comportamiento más estable. Comportamiento de ajuste de composición: la capa de óxido de la fase de cobre es conductora y ayuda a la corrosión, mientras que la capa de la fase de níquel es densa. El tratamiento térmico afecta el comportamiento; el recocido resulta en una superficie limpia y una oxidación más lenta. El comportamiento de corrosión de la reacción de oxidación en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno refleja un proceso de superficie interactivo con el oxígeno, lo que respalda la evaluación de la resistencia a la corrosión de la herramienta a través de la formación de capas y contribuye con referencias de comportamiento en la práctica de mantenimiento.

### 6.1.6 Control de las propiedades químicas de las tapas de remaches de aleación de tungsteno

Los factores ambientales que afectan las propiedades químicas de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se determinan principalmente por la temperatura, la humedad, el medio y la composición atmosférica. Esta influencia afecta la velocidad de reacción superficial y la estabilidad microestructural del mandril, que se manifiestan en diferentes condiciones de taller o almacenamiento. El aumento de temperatura regula la velocidad de oxidación, activando químicamente y térmicamente las colisiones moleculares y acelerando la formación de la capa de óxido en la superficie del mandril. Sin embargo, el alto punto de fusión de la fase de tungsteno modera el comportamiento general. El aumento de humedad implica vapor de agua, y la adsorción de agua en la superficie del mandril promueve la formación de hidróxido, lo que desplaza las propiedades químicas hacia un estado propenso a la corrosión.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La regulación del medio, como ácidos y álcalis, regula la actividad química disolviendo la fase aglutinante en ácidos, mientras que los álcalis estabilizan la capa de pasivación y regulan una buena resistencia a la corrosión. La composición atmosférica, como el oxígeno y el nitrógeno, regula la oxidación y la nitruración; la varilla superior es químicamente estable en aire limpio, pero la corrosión se acelera en ambientes contaminados. La luz o la radiación ultravioleta regulan las reacciones fotoquímicas superficiales, y las propiedades químicas de la varilla superior se mantienen prácticamente inalteradas durante el almacenamiento al aire libre.

Los factores ambientales, como la vibración y la tensión, también influyen en las propiedades químicas de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno. La tensión mecánica, al exponer las grietas, acelera el inicio de la corrosión. Las medidas de protección, como los recubrimientos, aíslan el entorno y mantienen las propiedades químicas originales. Los factores compositivos regulan la respuesta ambiental: la alta conductividad de la fase de cobre regula el comportamiento electroquímico, mientras que la fase de níquel regula la resistencia a los álcalis. La influencia de los factores ambientales en las propiedades químicas de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno refleja la interacción del material con las condiciones externas. El análisis factorial facilita la adaptación química de la herramienta y contribuye al marco regulatorio en el entorno de uso.

## **6.2 Mecanismo de oxidación a alta temperatura de las varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno**

se caracterizan principalmente por la interacción entre la superficie y el oxígeno. Este mecanismo se manifiesta cuando el mandril se expone a aire a alta temperatura o a un entorno de trabajo con altas temperaturas, lo que afecta la estabilidad de su superficie y su durabilidad general. El mecanismo de oxidación comienza con la adsorción de moléculas de oxígeno en la superficie del mandril. Químicamente, los elementos aglutinantes, como el níquel o el hierro, se combinan primero con el oxígeno para formar óxidos, seguido de la oxidación lenta de la fase de tungsteno para formar una capa densa. El proceso se desarrolla por etapas: a bajas temperaturas, la difusión controla el lento crecimiento de la capa de óxido, mientras que a altas temperaturas, la velocidad de reacción aumenta, dando lugar a una capa más gruesa.

El mecanismo principal reside en la selectividad de fase. La fase aglutinante, altamente reactiva, se oxida preferentemente, formando una capa de óxido laxa, mientras que la fase inerte de tungsteno forma una capa compacta de óxido de tungsteno. El mecanismo general del mandril cambia de oxidación rápida a autolimitación. La difusión de elementos en la interfaz participa en el mecanismo, donde el óxido de la fase aglutinante reacciona con el tungsteno para formar una capa compuesta, lo que resulta en un cambio en el color de la superficie del mandril. El tratamiento térmico afecta el mecanismo; tras el recocido, la microestructura es más uniforme y hay menos puntos de inicio de la oxidación. Las diferencias en los mecanismos de composición también influyen: en el sistema tungsteno-cobre, la capa de óxido de la fase cobre es conductora, mientras que en el sistema tungsteno-níquel, la capa de la fase níquel es densa. El mecanismo de oxidación a alta temperatura también incluye la volatilización; el óxido de tungsteno se vaporiza a altas temperaturas, arrastrando la capa superficial, lo que resulta en una pérdida gradual de

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

masa del mandril. También interviene un mecanismo de control de atmósfera protectora; un gas inerte reduce el contacto con el oxígeno, lo que resulta en una capa de óxido más delgada en el mandril. El análisis del mecanismo, mediante análisis termogravimétrico para observar los cambios de masa, muestra que una curva de oxidación plana indica una buena durabilidad. El mecanismo de oxidación a alta temperatura de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno refleja la respuesta al oxígeno de los compuestos refractarios, lo que favorece el mantenimiento de la superficie de la herramienta mediante la formación de capas y proporciona una base mecanicista para el funcionamiento en entornos térmicos.

### **6.2.1 Efecto de la cinética de oxidación en las varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno**

La cinética de oxidación en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se refleja principalmente en la regulación de la velocidad de reacción y el comportamiento de crecimiento de la capa. Esta influencia determina el grado de daño superficial y la durabilidad del mandril bajo exposición a altas temperaturas. La cinética de oxidación describe la difusión del oxígeno y la velocidad de reacción. La fase aglutinante en el mandril presenta una alta actividad cinética, lo que resulta en una rápida formación de la capa inicial, mientras que la fase de tungsteno presenta una cinética lenta y un crecimiento de la capa autolimitado. El mecanismo de influencia se manifiesta en el control de la difusión, con la migración del oxígeno hacia el interior a través de los espacios entre capas, impulsado por un gradiente de concentración química, y el aumento del espesor de la capa del mandril se ralentiza con el tiempo.

Los efectos cinéticos también incluyen la dependencia de la temperatura: al aumentar la temperatura, se reduce la energía de activación, pero aumenta la velocidad; a altas temperaturas, el espesor de la capa capilar aumenta, pero la pasivación se estabiliza. La cinética composicional difiere: las fases de cobre presentan una cinética rápida, conduciendo el calor y facilitando su disipación, mientras que las fases de níquel, al ser más densas, presentan una cinética lenta. La cinética del tratamiento térmico también influye: el recocido produce límites de grano más limpios y trayectorias de difusión más cortas, lo que conlleva menores velocidades de oxidación capilar. La cinética del estado superficial regula la oxidación: las superficies pulidas presentan velocidades de oxidación inicial más bajas, mientras que las superficies rugosas presentan más sitios activos y velocidades más altas. El análisis de impacto de la cinética de oxidación, mediante el ajuste de curvas termogravimétricas, utiliza modelos cinéticos de mandril lineales o parabólicos para reflejar el tipo de crecimiento de la capa. Esta influencia guía la protección, modificando la iniciación cinética de los cambios de recubrimiento y mejorando la durabilidad del mandril. La cinética de oxidación de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno demuestra la respuesta del material con control de velocidad, respalda la evaluación de la durabilidad de la herramienta mediante el análisis de difusión y aporta una base cinética para la operación en caliente.

### **6.2.2 Aplicación de recubrimiento protector en mandriles de remaches de aleación de tungsteno**

La aplicación de recubrimientos protectores en mandriles de remaches de aleación de tungsteno implica principalmente la formación de una barrera mediante recubrimiento o pasivación. Esta aplicación reduce la oxidación y la corrosión en la superficie del mandril, manteniendo su estabilidad y vida útil en el

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

ambiente. El mecanismo de recubrimiento bloquea la difusión de oxígeno y otros medios; químicamente, las capas de recubrimiento, como las de níquel-fósforo o cromo-nitrógeno, se adhieren firmemente al sustrato, manteniendo la superficie lisa del mandril. Los procesos de aplicación incluyen galvanoplastia o deposición química de vapor, y el recubrimiento se adhiere uniformemente después del pulido del mandril.

Las ventajas de esta aplicación residen en la protección selectiva; el recubrimiento ralentiza los daños causados por la fricción en el mandril resistente al desgaste y resiste la corrosión en medios corrosivos. Los recubrimientos de pasivación se autogeneran, y la capa de óxido del mandril se espesa al aire para proteger el sustrato. Las diferencias de composición dan lugar a recubrimientos conductores (sistema tungsteno-cobre) y recubrimientos de alta dureza ( sistema tungsteno-níquel) . El tratamiento térmico garantiza la estabilidad del recubrimiento y el recocido proporciona una fuerte adhesión.

La aplicación de recubrimientos protectores en mandriles también evalúa la durabilidad; las pruebas de pelado verifican la adhesión y el recubrimiento no se desprende con el uso repetido. El recubrimiento rellena la textura de la superficie, lo que resulta en un bajo coeficiente de fricción para el mandril. Presenta una buena estabilidad química y no introduce nuevas fuentes de corrosión. La aplicación de recubrimientos protectores en mandriles de remaches de aleación de tungsteno representa una estrategia de protección de ingeniería de superficies, que refuerza la durabilidad de la herramienta mediante un efecto barrera y aporta valor a la aplicación en el entorno operativo.

### **6.2.3 Daños en las barras superiores de remaches de aleación de tungsteno causados por la formación de óxidos volátiles**

El daño a los mandriles de remaches de aleación de tungsteno causado por la formación de óxido volátil ocurre principalmente en ambientes con aire a alta temperatura. Este daño es causado por la transformación inestable de la capa de óxido superficial, lo que lleva a una pérdida gradual de material y afecta la precisión dimensional y la integridad de la superficie del mandril. Los óxidos volátiles, como el óxido de tungsteno, cambian de un estado sólido a uno gaseoso a altas temperaturas, escapando de la superficie del mandril. Químicamente, experimentan una reacción de oxidación para formar óxido de tungsteno, que se volatiliza aún más al calentarse, lo que resulta en una superficie de trabajo más delgada y una mayor rugosidad. El proceso de daño comienza con la adsorción de oxígeno en la superficie del mandril; la fase aglutinante se oxida primero para proporcionar la capa inicial, seguida de la fase de tungsteno, generando productos de volatilización.

El mecanismo de daño se manifiesta en el gradiente de temperatura; la volatilización es rápida en zonas de alta temperatura, y los óxidos superficiales se vaporizan rápidamente cuando la fricción local genera calor en el mandril, acelerando la eliminación de material y formando picaduras o irregularidades. Los óxidos volátiles alteran la uniformidad del mandril, con mayor volatilización en los bordes y menor en el centro, lo que resulta en un cambio gradual en la forma del mandril y un soporte inestable del remache. La estabilidad química también afecta el daño; la volatilización es más lenta cuando la capa de óxido aglutinante es densa y se acelera cuando es porosa debido a la exposición al tungsteno.

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



El daño causado por la formación de óxido volátil se extiende al interior del mandril. Después de que la capa superficial se desprende, la nueva capa se oxida, lo que lleva a una pérdida de masa acumulada y acorta la vida útil. La respuesta al daño cambia después del tratamiento térmico; el recocido resulta en una microestructura más uniforme y menos puntos de inicio de la volatilización. La regulación de la composición causa daño; una fase de cobre más alta conduce a una mejor conductividad térmica y una menor disipación de calor, lo que resulta en una menor volatilización; la fase de níquel forma óxidos estables, restringiendo la volatilización. El análisis de daños, mediante análisis termogravimétrico (TGA), observa cambios de masa; una curva de volatilización plana en el mandril indica buena durabilidad. El daño a los mandriles de remaches de aleación de tungsteno causado por la formación de óxido volátil refleja el consumo de material de las reacciones gas-sólido a alta temperatura. El escape de producto respalda la evaluación de la vida útil de la herramienta y proporciona una referencia para los mecanismos de daño en entornos calientes.

#### **6.2.4 Regulación de la resistencia a la oxidación de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno mediante elementos de aleación**

La oxidación de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno mediante elementos de aleación se logra principalmente mediante la formación de una capa de óxido estable o el ajuste de la cinética de reacción. Esta regulación ralentiza el daño superficial en aire a alta temperatura, manteniendo la suavidad y la durabilidad. Elementos de aleación como el níquel, el hierro o el cobre participan en el proceso de oxidación. Químicamente, el níquel forma una densa capa de óxido de níquel que bloquea la difusión de oxígeno y mejora la resistencia a la oxidación del mandril. El hierro forma una capa compuesta de óxido de hierro que regula la velocidad de oxidación y ralentiza el cambio de color de la superficie del mandril. La fase de cobre regula la conductividad térmica, lo que resulta en una rápida disipación del calor, reduciendo las altas temperaturas localizadas y retrasando el inicio de la oxidación.

El mecanismo regulador se manifiesta en el efecto sinérgico: la fase aglutinante oxida y consume oxígeno preferentemente, generando una capa no volátil que protege la fase de tungsteno, lo que resulta en una alta resistencia general a la oxidación del mandril. El microdopaje de tierras raras regula la purificación del límite de grano, reduciendo los puntos de inicio de la oxidación y ralentizando el aumento del espesor de la capa del mandril. El tratamiento térmico regula la respuesta, asegurando una difusión uniforme de los elementos después del recocido y una resistencia a la oxidación constante. La proporción de la composición regula la tendencia a la oxidación, lo que resulta en una fase aglutinante más gruesa y multicapa para una mejor protección y una mayor durabilidad del mandril.

También se evaluó la regulación de la resistencia a la oxidación de los mandriles mediante elementos de aleación a través del tratamiento superficial. El recubrimiento y los elementos formaron sinérgicamente una protección multicapa, resultando en una fina capa de óxido sobre el mandril. Se reguló la estabilidad química, con la oxidación selectiva de elementos produciendo productos estables y una pérdida mínima de masa del mandril. El análisis de regulación, mediante pruebas de oxidación observando el espesor y la morfología de la capa, mostró que la curva plana de resistencia a la oxidación del mandril indicó una regulación efectiva. La regulación de la resistencia a la oxidación de los mandriles de remaches de

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



aleación de tungsteno mediante elementos de aleación refleja una estrategia material de optimización compositiva. La formación de capas apoya la estabilidad superficial de la herramienta y proporciona una base para la regulación durante la operación en caliente.

### 6.3 Prueba de durabilidad ambiental de la barra superior del remache de aleación de tungsteno

evalúan principalmente su retención de rendimiento en entornos húmedos o corrosivos mediante la simulación de condiciones como la niebla salina y los ciclos de humedad. Estas pruebas ayudan a comprender la estabilidad a largo plazo de la superficie y la estructura general del mandril, lo que orienta la selección de materiales y las medidas de protección. Los métodos de prueba incluyen la prueba de niebla salina, que simula entornos marinos o de niebla salina, y la prueba de ciclos de humedad, que evalúa los efectos de los cambios de temperatura y humedad. La estructura bifásica de las aleaciones de tungsteno se evidencia en las pruebas: la fase de tungsteno presenta una fuerte resistencia a la corrosión, mientras que la fase aglutinante es susceptible a los iones de cloruro o la humedad. Se observan cambios superficiales, pérdida de masa y degradación del rendimiento tras la exposición a las muestras de prueba, y el análisis químico de los productos de corrosión revela los mecanismos subyacentes. La importancia de las pruebas de durabilidad ambiental reside en predecir el rendimiento de los mandriles en talleres reales o en almacenamiento al aire libre. La prueba de niebla salina acelera la corrosión por picaduras debido a los iones de cloruro, mientras que los ciclos de humedad inducen corrosión bajo tensión. Las normas de prueba se basan en las especificaciones de la industria, y los tiempos y condiciones de exposición se adaptan a los escenarios de aplicación. Los resultados orientan los tratamientos superficiales, los recubrimientos o la pasivación para mejorar la durabilidad. Las pruebas de durabilidad ambiental de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno demuestran la adaptabilidad del material a condiciones complejas, respaldan la predicción de la vida útil de la herramienta a través de simulación experimental y brindan una referencia práctica para el mantenimiento del remachado.

#### 6.3.1 Evaluación de varillas de remaches de aleación de tungsteno mediante prueba de niebla salina

La prueba de pulverización salina en mandriles de remaches de aleación de tungsteno consiste principalmente en simular un entorno de pulverización salina neutra o ácida, exponer las muestras de mandril y observar los cambios en la morfología y la velocidad de corrosión. Esta evaluación ayuda a determinar la estabilidad y durabilidad de la superficie de los mandriles en condiciones de humedad con cloro. En la prueba, los mandriles se colocan en una cámara de pulverización salina, donde se pulveriza cloruro de sodio. Químicamente, los iones de cloruro se adsorben en la superficie, destruyendo la capa de pasivación, y la fase aglutinante se disuelve preferentemente, formando picaduras o corrosión uniforme. El proceso de evaluación registra las manchas de óxido superficial, las picaduras y la pérdida de masa después del tiempo de exposición. La fase de tungsteno en el mandril exhibe una fuerte resistencia al cloro, y la corrosión se inicia en la región de la fase aglutinante.

El mecanismo de evaluación se refleja en las microceldas: la fase aglutinante se disuelve en el extremo galvánico anódico, la fase de tungsteno proporciona protección catódica y, si bien la varilla superior muestra una baja tendencia a la corrosión por picaduras, el daño localizado es significativo. Se evalúa la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eficacia del tratamiento superficial: el recubrimiento presenta una larga tolerancia a la niebla salina y pocos productos de corrosión. Se evalúa el impacto del tratamiento térmico: el recocido da como resultado una microestructura uniforme y una lenta penetración del cloro. Se evalúan las diferencias de composición: el sistema tungsteno-cobre exhibe una reducción de la corrosión asistida por conductividad, mientras que las propiedades magnéticas del sistema tungsteno-níquel-hierro no afectan directamente a la corrosión, pero la unión interfacial regula la propagación de la corrosión.

Las pruebas de niebla salina evalúan la idoneidad de las aplicaciones de los mandriles. Los mandriles utilizados en talleres marinos requieren una alta resistencia a la niebla salina, mientras que aquellos que cumplen con las normas ambientales generales son suficientes. La evaluación guía el mantenimiento, haciendo hincapié en la limpieza regular de los mandriles sensibles a la niebla salina. El análisis químico de los productos de corrosión y los tipos de óxido revela los mecanismos subyacentes. Las pruebas de niebla salina proporcionan una perspectiva simulada de la corrosión inducida por cloro en mandriles de remaches de aleación de tungsteno, lo que facilita la comprensión de la resistencia de las herramientas a la niebla salina mediante la observación morfológica y contribuye a la base de la evaluación en operaciones con humedad.

### **6.3.2 El papel del ciclo de humedad en la durabilidad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno**

El ciclo de humedad en la durabilidad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se refleja principalmente en la simulación del comportamiento de corrosión bajo tensión y oxidación inducido por la alternancia de temperatura y humedad. Este efecto ayuda a evaluar el rendimiento a largo plazo del mandril en entornos de humedad variable y guía las condiciones de almacenamiento y uso. El proceso de ciclo alterna entre alta humedad y alta temperatura, seguido de baja humedad y baja temperatura. Químicamente, la adsorción de humedad en la superficie promueve la oxidación, y los cambios de temperatura generan estrés térmico, lo que lleva a repetidos daños y reparación de la capa de pasivación del mandril. El mecanismo se manifiesta en la condensación del vapor de agua; bajo alta humedad, se forma una película líquida en la superficie, formando un electrolito, y la fase aglutinante se disuelve ligeramente; bajo baja humedad, se libera el estrés de secado.

Los efectos también incluyen la acumulación de fatiga, la microtensión repetida durante el ciclo y la lenta propagación del microdaño en la interfaz del mandril. Los efectos superficiales son significativos; el espesor de la capa de óxido aumenta con la humedad alta y se agrieta con la humedad baja, reduciendo gradualmente la suavidad de la superficie del mandril. El tratamiento térmico también influye; el recocido resulta en una menor tensión y menos daño cíclico. Las diferencias de composición también influyen; la fase de cobre presenta una rápida conductividad y disipación térmica con una mínima influencia de la humedad, mientras que la fase de níquel proporciona estabilidad de pasivación y buena tolerancia al ciclo.

El ciclo de humedad se utiliza para evaluar la durabilidad de las tapas de remaches en almacenamiento. Las tapas para ambientes templados o tropicales requieren una alta adaptabilidad al ciclo. Este estudio guía las medidas de protección, incluyendo el sellado del embalaje para reducir la exposición a la

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

humedad. El análisis químico de los productos post-ciclo y la distribución de óxido revelan el mecanismo. El papel del ciclo de humedad en la durabilidad de las tapas de remaches de aleación de tungsteno proporciona una perspectiva de simulación de condiciones de humedad, respalda la evaluación de la vida útil de la herramienta mediante la respuesta cíclica y contribuye a la base de su función en el almacenamiento ambiental.

### 6.3.3 Integración de simulación multiescala en remaches de aleación de tungsteno

La integración de simulaciones multiescala en mandriles de remaches de aleación de tungsteno combina principalmente modelos atómicos, microscópicos y macroscópicos. Esta integración ayuda a predecir el comportamiento del mandril bajo tensiones y entornos complejos, lo que orienta el diseño de materiales y la optimización del rendimiento. El enfoque multiescala comienza con cálculos mecánicos cuánticos de las interacciones elementales, seguidos del análisis químico de la energía de enlace entre el tungsteno y la fase aglutinante para determinar las vías de difusión. Esto se extiende a simulaciones de dinámica molecular del movimiento de dislocación y las respuestas de los límites de grano, y finalmente a modelos macroscópicos de elementos finitos para evaluar la distribución de tensiones.

El proceso de integración revela el impacto de la segregación de elementos de aleación en la resistencia interfacial a escala atómica y predice la iniciación de microfisuras en la zona de concentración de tensiones del mandril. La simulación de la dinámica de dislocaciones discretas a microescala de la deformación por impacto aclara el mecanismo de coordinación bifásica del mandril. Un modelo macroscópico continuo integra parámetros microscópicos, lo que permite estimar la vida útil total a fatiga del mandril. La integración de la simulación se logra mediante la transferencia de parámetros; la simulación atómica genera energía de enlace a las entradas microscópicas, y los resultados microscópicos calibran el modelo constitutivo macroscópico.

En las aplicaciones, las simulaciones multiescala evalúan la evolución del daño de los mandriles bajo cargas de remachado. Factores ambientales como la humedad se incorporan al modelo de corrosión para predecir la sensibilidad de los mandriles a la corrosión bajo tensión. La optimización e integración de la composición simulan los cambios de rendimiento de diferentes proporciones de la fase aglutinante, logrando un equilibrio entre la tenacidad y la resistencia de los mandriles. Las simulaciones de tratamiento térmico muestran la evolución del grano, definiendo claramente el camino para mejorar la durabilidad de los mandriles. La integración de simulaciones multiescala en mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una perspectiva computacional desde el nivel atómico hasta el de componente, facilita la predicción del rendimiento de la herramienta mediante el anidamiento de modelos y contribuye a la optimización del diseño mediante simulación.

### 6.3.4 Prueba de sensibilidad del agrietamiento por corrosión bajo tensión en mandriles de remaches de aleación de tungsteno

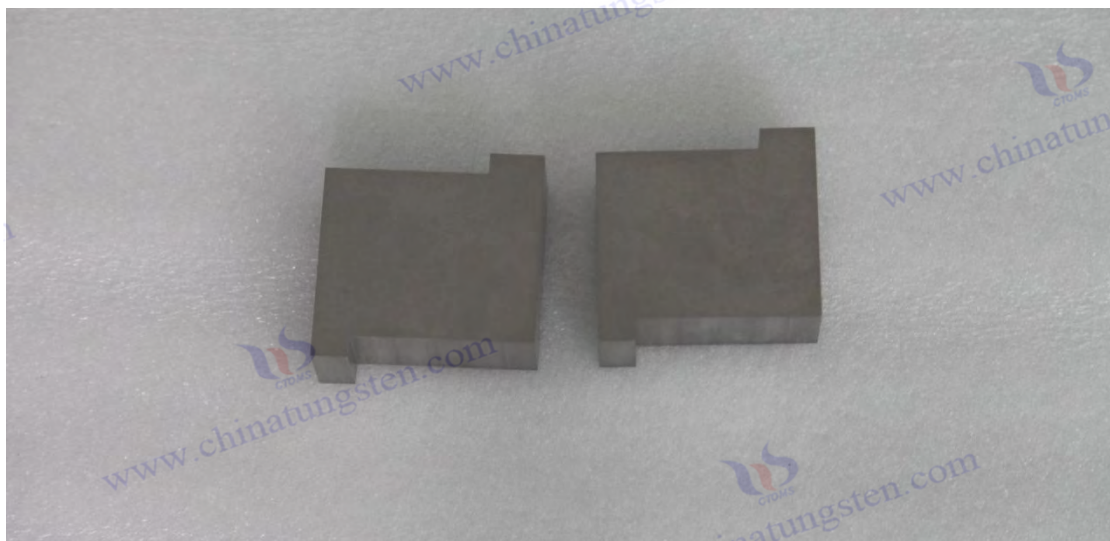
La resistencia a la corrosión bajo tensión en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se prueba principalmente mediante ensayos de tracción a carga constante o a baja velocidad de deformación. Estos

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ensayos aplican tensión en un medio corrosivo simulado, observando el inicio y la propagación de la grieta para evaluar su durabilidad en condiciones de carga húmeda. Las muestras se entallan previamente o se alisan y se sumergen en un medio que contiene cloro o azufre. Químicamente, la tensión promueve la disolución anódica, lo que provoca agrietamiento sinérgico con la corrosión del medio. Los ensayos de carga constante mantienen una tensión fija y observan los resultados hasta la fractura. Los ensayos de tracción a baja velocidad de deformación cargan dinámicamente y registran los cambios en la curva.

El proceso de prueba se divide en etapas. En la etapa inicial, la capa de pasivación se daña, la fase aglutinante se disuelve, lo que induce corrosión por picaduras, y la concentración de tensiones provoca la formación de grietas. En la etapa intermedia, las grietas se propagan a lo largo de los límites de grano o interfaces, y la trayectoria de la grieta se curva en la estructura bifásica de la barra superior. En la etapa posterior, la fractura se acelera y la propagación es lenta cuando la barra superior presenta buena tenacidad. La temperatura y la humedad del entorno de prueba se controlan, y los factores acelerantes, como los iones de cloruro, aumentan la sensibilidad.

Las pruebas de sensibilidad evalúan la idoneidad de las aplicaciones de mandril; los mandriles utilizados en talleres húmedos requieren baja sensibilidad, mientras que los de entornos secos cumplen con los estándares. Las pruebas de tratamiento térmico tienen un impacto; la tensión de recocido reduce la sensibilidad. Las diferencias de composición contribuyen a una menor sensibilidad; los sistemas de níquel-cobre exhiben una menor sensibilidad y los mandriles muestran una mejor resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión. Las pruebas guían la protección; los recubrimientos aíslan el medio, lo que reduce la sensibilidad. Las pruebas de sensibilidad de mandriles de remaches de aleación de tungsteno a través del agrietamiento por corrosión bajo tensión proporcionan una perspectiva experimental de la sinergia carga-medio, respaldando la evaluación de la durabilidad de la herramienta a través de la observación de grietas y contribuyendo a la base de las pruebas en entornos húmedos. La naturaleza sistemática de las pruebas garantiza la consistencia de lote a lote en la sensibilidad del mandril, proporcionando una ruta de retroalimentación para mejoras del proceso.



CTIA GROUP LTD Varilla superior con remache de aleación de tungsteno

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/cm<sup>3</sup>), 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

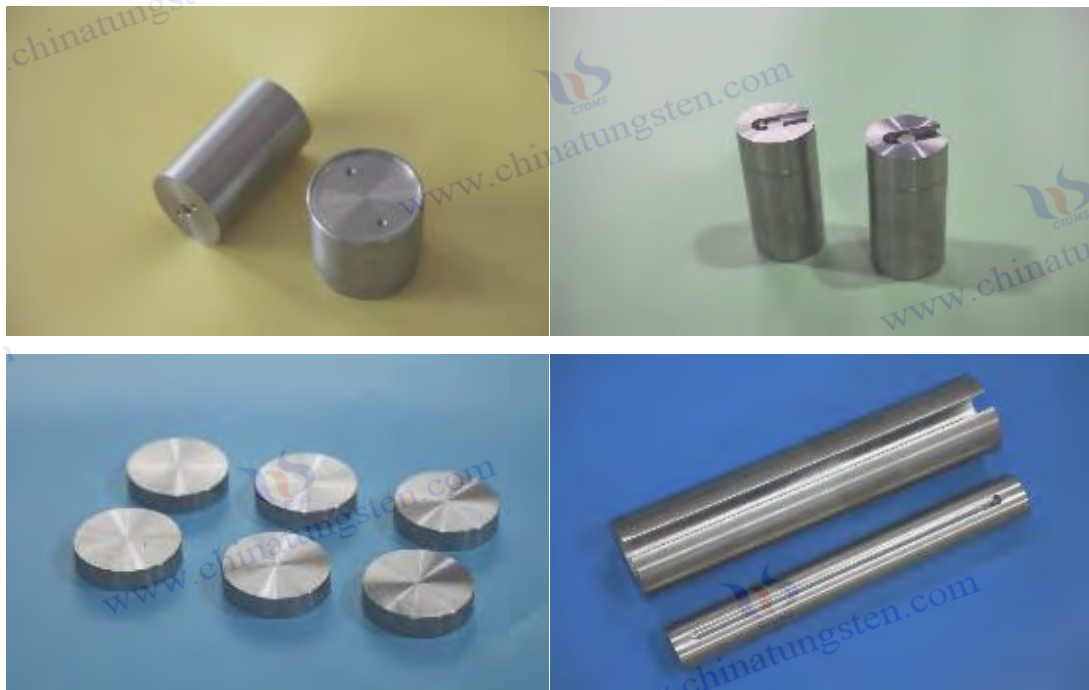
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Capítulo 7 Aplicación de varillas de remache de aleación de tungsteno

### 7.1 Aplicación de barras superiores de remaches de aleación de tungsteno en el proceso de remachado

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno se utilizan principalmente como herramientas de soporte inverso en procesos de remachado. Esta aplicación es evidente en la unión permanente de láminas o componentes metálicos, lo que ayuda a que la cola del remache se deforme uniformemente para formar una unión resistente. El mandril se coloca en un extremo del remache, soportando el impacto del martilleo o la presión. La alta densidad y dureza de la aleación de tungsteno concentran la fuerza de reacción, permitiendo un flujo de plástico uniforme en la cabeza del remache. Sus aplicaciones incluyen remachado manual, pistolas remachadoras neumáticas y líneas de montaje automatizadas. La forma del mandril se adapta al tipo de remache y su superficie lisa reduce la fricción.

de remachado, la función del pasador expulsor es controlar la zona de deformación. Su superficie de trabajo, plana o cóncava, permite la expansión de la cola, garantizando una resistencia de conexión constante. Los pasadores expulsores de aleación de tungsteno, gracias a su resistencia al impacto, soportan operaciones de alta frecuencia, presentan un desgaste superficial lento y requieren un mantenimiento mínimo. Sus aplicaciones incluyen el remachado de diferentes materiales; los remaches de aleación de aluminio se combinan con pasadores expulsores de dureza equilibrada, mientras que los remaches de acero requieren pasadores expulsores de alta resistencia. La estabilidad química del pasador expulsor lo hace resistente a la contaminación por refrigerante o aceite, lo que garantiza una buena adaptabilidad a los entornos de montaje.

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno en procesos de remachado demuestran el valor ingenieril de los materiales para herramientas, mejorando la eficiencia de la conexión mediante la optimización del soporte y proporcionando un rendimiento fiable en el ensamblaje industrial. Con la diversificación de las tecnologías de remachado, esta aplicación se está expandiendo, aportando un soporte práctico a los procesos de conexión.

#### 7.1.1 Acción mecánica del mandril de remache de aleación de tungsteno durante la formación del remache

Durante el proceso de conformado de remaches, la función mecánica del mandril de remache de aleación de tungsteno se refleja principalmente en proporcionar soporte inverso y transferencia de energía. Esta función permite que la cola del remache experimente una deformación plástica uniforme bajo impacto o presión, formando una unión fiable. Como componente de reacción rígido, el mandril soporta la carga del martillo. La alta densidad y la fuerte inercia de la aleación de tungsteno concentran la fuerza de reacción en la cola del remache, mientras que la cabeza fluye suavemente sin deflexión. El mecanismo mecánico se manifiesta en la distribución de la tensión; la superficie de trabajo del mandril se ajusta perfectamente a la cola, garantizando una tensión uniforme y evitando sobrecargas locales, lo que resulta en una deformación simétrica del remache.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sus funciones también incluyen la absorción de vibraciones, ya que la fase de unión de la varilla superior se coordina con la microdeformación para reducir la holgura del equipo y garantizar un funcionamiento suave. Químicamente, presenta baja fricción interfacial, una superficie lisa de la varilla superior que reduce la acumulación de calor y un lento aumento de temperatura durante el conformado del remache. El cuerpo de la varilla superior posee una alta resistencia, lo que evita la flexión bajo carga axial y proporciona un soporte estable. Los efectos mecánicos se manifiestan en los diferentes tipos de remaches: las varillas superiores con remaches ciegos se adaptan a la expansión, mientras que las varillas superiores con remaches autopercutores resisten el cizallamiento.

El mandril, durante el remachado, optimiza la calidad de la conexión. Su dureza se adapta al material del remache, lo que garantiza una deformación controlada y previene el agrietamiento. En la práctica, el mandril fija la remachadora, garantizando una transferencia directa de la carga y una fuerza de bloqueo constante. La acción mecánica del mandril de aleación de tungsteno demuestra la contribución mecánica de una herramienta de soporte, controlando de forma fiable la deformación del remachado mediante la coordinación de la fuerza de reacción, lo que proporciona una base mecánica para la práctica del montaje.

### 7.1.2 Mecanismo de interacción entre los materiales de la varilla superior y el remache

El mecanismo de interacción entre los materiales del mandril y el remache implica principalmente la fricción de la superficie de contacto, la conducción de calor y la coordinación de la deformación. Este mecanismo determina la calidad de la conexión y la durabilidad del mandril durante el remachado. El mecanismo comienza con el contacto de la superficie de trabajo del mandril con la cola del remache; al impactar, la fricción genera cizallamiento; químicamente, una superficie lisa resulta en un bajo coeficiente de fricción, minimizando el deslizamiento del remache y asegurando una deformación uniforme. La interacción incluye intercambio de calor: la deformación plástica del remache genera calor, que se conduce al mandril; la aleación de tungsteno proporciona conductividad térmica y ayuda a la disipación del calor; y el gradiente de temperatura es suave.

El mecanismo también implica la transferencia de material: cuando el remache está blando, una pequeña cantidad se adhiere al mandril; cuando el mandril está duro, se transfiere menos material y la superficie es más fácil de limpiar. La fase adhesiva se coordina con la microdeformación, absorbiendo la energía de rebote del remache y estabilizando así la forma del mandril. También interviene un mecanismo de estabilidad química: la capa de pasivación de la superficie del mandril resiste la corrosión causada por los óxidos del remache, y el mandril mantiene su suavidad tras la interacción.

El mecanismo de interacción se ve influenciado por el material del remache; los remaches de aluminio presentan una interacción suave y moderada, mientras que los remaches de acero requieren una alta resistencia al desgaste del mandril debido a la fuerte fricción. Los mecanismos optimizados de tratamiento superficial reducen la adhesión en el recubrimiento del mandril, lo que resulta en una formación más uniforme del remache. El mecanismo de interacción entre el mandril y los materiales del remache refleja la respuesta del material a la interacción de contacto, lo que contribuye a la estabilidad

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del proceso de remachado mediante la coordinación friccional-térmica y contribuye a un mecanismo fundamental para el proceso de unión.

#### **7.1.2.1 Análisis de la distribución de la tensión de contacto en aplicaciones de varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno**

El análisis de la distribución de la tensión de contacto en aplicaciones de mandriles de remaches de aleación de tungsteno se centra principalmente en la transmisión de presión y las características de carga local entre la superficie de trabajo del mandril y la cola del remache. Este análisis ayuda a comprender la uniformidad del soporte y el efecto de control de la deformación del mandril durante el remachado. La distribución de la tensión de contacto se origina en la fuerza de reacción entre la cara final del mandril y la cola del remache. La alta dureza de la aleación de tungsteno provoca que la tensión se concentre en el centro de contacto, disminuyendo gradualmente en los bordes, formando una distribución en gradiente. Químicamente, la fricción interfacial afecta la distribución; una superficie lisa produce una tensión más uniforme, mientras que una superficie rugosa produce picos de tensión locales más elevados.

El análisis se realizó mediante simulación de elementos finitos o pruebas de indentación. El mandril exhibe una fuerte rigidez axial, con una lenta disminución de la tensión a lo largo del radio y una presión constante en la zona de deformación en la cola del remache. El diseño cóncavo del mandril ajusta la distribución de la tensión, acomodando la expansión de la cola y difundiendo la tensión hacia los bordes para evitar la sobrecarga en el centro. Después del trabajo en caliente, la microestructura se vuelve fibrosa, lo que resulta en una transmisión de tensión axial más fuerte y una distribución de tensión más estable en el mandril. El análisis de la composición también revela la influencia del alto contenido de tungsteno, lo que conduce a una alta rigidez y una distribución concentrada, mientras que la presencia de una alta fase aglutinante asegura una tensión más flexible y uniformemente distribuida.

El análisis de la distribución de la tensión de contacto también evaluó la compatibilidad del material del remache; los remaches blandos mostraron una distribución de la tensión amplia y uniforme, mientras que los remaches duros requirieron un mandril de alta dureza. El análisis del tratamiento superficial reveló que el recubrimiento redujo el coeficiente de fricción y optimizó la distribución de la tensión. El análisis de estabilidad química mostró que la superficie del mandril permaneció inalterada sin una capa reactiva. El análisis de la distribución de la tensión de contacto en aplicaciones de mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una perspectiva mecánica de la interacción de la presión, y la distribución optimizada refuerza el rendimiento de la herramienta, aportando una base analítica a los procesos de remachado.

#### **7.1.2.2 Influencia de la coordinación de la deformación en la durabilidad de las tapas de remaches de aleación de tungsteno**

La coordinación de la deformación en la durabilidad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se refleja principalmente en la respuesta de la microestructura de doble fase a la tensión y la deformación. Esta influencia permite que el mandril absorba energía durante los impactos del remachado,

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

reduciendo la acumulación de daños. El mecanismo de coordinación de la deformación se origina en la sinergia entre el esqueleto rígido de partículas de tungsteno y la red plástica de la fase aglutinante. Durante el impacto, la fase de tungsteno resiste la compresión, mientras que la fase aglutinante se extiende para amortiguar la expansión lateral, lo que resulta en una pequeña deformación general del mandril y una ligera indentación de la superficie de trabajo.

El proceso de impacto se desarrolla en etapas: inicialmente, se produce coordinación elástica y tensión uniforme; en la etapa intermedia, se produce deformación plástica, y la fase aglutinante se desliza y absorbe energía, lo que resulta en un microdaño mínimo en el mandril; en la etapa posterior, se produce la recuperación, y la forma del mandril se mantiene. Químicamente, la unión interfacial es fuerte y la coordinación se logra sin separación. El tratamiento térmico afecta la coordinación; el recocido resulta en una menor densidad de dislocaciones y una mejor coordinación, lo que resulta en una mayor resistencia a la fatiga en el mandril. La composición también afecta la coordinación; el sistema níquel-cobre exhibe ductilidad y coordinación superiores, lo que resulta en una recuperación más rápida del mandril después del impacto.

El impacto de la coordinación de la deformación también evalúa el daño superficial; una buena coordinación resulta en un desgaste uniforme del mandril y una mayor vida útil. Una alta dureza del remache requiere una fuerte coordinación, y una relación de unión del mandril moderada es esencial. El tratamiento superficial afecta la coordinación; los recubrimientos flexibles ayudan a absorber la deformación. La influencia de la coordinación de la deformación en la durabilidad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno refleja un mecanismo de material de respuesta en la interfase, que favorece la vida útil de la herramienta mediante una coordinación optimizada y contribuye a una base de durabilidad en la práctica del remachado.

### **7.1.3 Requisitos para el rendimiento de los remachadores de aleación de tungsteno en remachado de alta resistencia**

Los requisitos para los mandriles de remaches de aleación de tungsteno en el remachado de alta resistencia se centran principalmente en la resistencia al impacto, la distribución de la dureza y la estabilidad dimensional. Estos requisitos se derivan del hecho de que los remaches de alta resistencia, como los de aleación de titanio o acero de alta resistencia, requieren una mayor fuerza de reacción y un soporte preciso durante la deformación. El mandril necesita alta dureza para resistir el desgaste por indentación en la cola del remache. El esqueleto de partículas de tungsteno de la aleación de tungsteno proporciona rigidez, y la fase de unión coordina la microdeformación, evitando la rápida abolladura o astillado de la superficie de trabajo del mandril. Químicamente, exhibe una fuerte unión interfacial, evitando la separación bajo concentración de tensión y asegurando una capacidad de carga general uniforme.

Los requisitos también incluyen la resistencia a la fatiga; el remachado de alta resistencia suele implicar operaciones de alta frecuencia, y la acumulación de daños bajo el impacto cíclico del mandril es lenta, ya que la fibrosis tisular mejora la resistencia a la fatiga. Una alta estabilidad térmica también es crucial,

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



con una baja tendencia al ablandamiento del mandril bajo el calor del remachado o en condiciones de remachado en caliente, lo que minimiza los cambios dimensionales y mantiene un ajuste preciso. La alta densidad garantiza una fuerte fuerza de reacción inercial, una presión concentrada en la zona de deformación del remache y una resistencia de conexión constante.

El remachado de alta resistencia requiere una superficie lisa en el mandril, un bajo coeficiente de fricción para reducir la acumulación de calor y un aumento lento de la temperatura. La estabilidad química es fundamental para resistir la corrosión por refrigerante, garantizando así que la superficie del mandril permanezca libre de picaduras incluso después de un uso prolongado. La forma de la cara final debe ser cóncava para soportar grandes deformaciones y proporcionar un soporte estable. Los requisitos de rendimiento de los mandriles de remache de aleación de tungsteno en el remachado de alta resistencia reflejan la adaptabilidad de la herramienta a cargas elevadas, lo que favorece la calidad de la conexión mediante un equilibrio entre dureza y tenacidad, y proporciona un rendimiento fiable en ensamblajes exigentes.

#### **7.1.4 Adaptabilidad de las barras superiores de remaches de aleación de tungsteno en equipos de remachado automatizados**

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno en equipos de remachado automatizados se caracterizan principalmente por su rápida sustitución, precisión de posicionamiento y durabilidad. Esta adaptabilidad permite que el mandril se integre a la perfección con robots o remachadoras CNC , mejorando así la eficiencia del montaje. El extremo fijo del mandril cuenta con una interfaz estándar para una rápida instalación mediante encaje a presión o rosca. La alta redondez del mandril de aleación de tungsteno garantiza una buena repetibilidad de posicionamiento y el equipo lo sujeta de forma estable y sin desviaciones. La superficie tratada químicamente es lisa y de baja fricción, lo que permite una inserción fluida del mandril en el equipo.

La adaptabilidad del mandril durante la operación automatizada de alta frecuencia reduce los daños por resonancia. Su alta dureza se adapta a impactos de alta velocidad; el desgaste uniforme de la superficie de trabajo del mandril prolonga su vida útil, reduciendo el tiempo de inactividad para reemplazos. La estabilidad térmica se adapta al remachado continuo; la disipación de calor del mandril facilita un aumento lento de la temperatura, minimizando el impacto en la precisión debido a que las dimensiones permanecen inalteradas. Su densidad moderada se adapta a la carga del equipo; la masa del mandril no aumenta la carga sobre el brazo robótico.

En un equipo automatizado , la adaptabilidad de los mandriles requiere diversas caras finales, con alternancia de cóncavo a plano para soportar diferentes remaches, y un inventario estandarizado de mandriles. La estabilidad química se adapta a los medios de refrigeración, lo que resulta en una corrosión lenta y un mantenimiento mínimo. La adaptabilidad de los mandriles para remaches de aleación de tungsteno en equipos de remachado automatizados demuestra la coordinación entre herramientas y maquinaria, lo que facilita la automatización del ensamblaje mediante la adaptación de la interfaz y el rendimiento, lo que aporta valor a la eficiencia de la línea de producción.

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

## 7.2 Aplicación de barras superiores remachadas de aleación de tungsteno en conexiones estructurales aeroespaciales

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno se utilizan principalmente en conexiones estructurales aeroespaciales como herramientas de soporte para remaches de alta resistencia. Esta aplicación se observa en el ensamblaje de fuselajes de aeronaves, componentes de motores y estructuras de satélites, lo que permite lograr conexiones fiables con materiales ligeros y de alta resistencia. La alta densidad y dureza del mandril proporcionan una fuerza de reacción estable, la microestructura bifásica de la aleación de tungsteno coordina la deformación por impacto y la superficie de trabajo lisa del mandril reduce el daño al material. Las conexiones aeroespaciales priorizan el control de peso y la resistencia a la fatiga; los mandriles de aleación de tungsteno, con su densidad moderada y buena durabilidad, son adecuados para entornos con cargas repetidas.

Aplicaciones: el mandril soporta remaches de aleación de titanio o de material compuesto, con un diseño de cara final que se adapta a la forma del remache. La superficie cóncava facilita la expansión de la cola, mientras que la superficie plana proporciona un soporte de precisión temporal. Presenta una gran estabilidad química, resistente a los agentes de limpieza aeroespaciales, y su superficie no se corroe, lo que no afecta la conexión. Ofrece buena compatibilidad con equipos de remachado automatizados, con interfaces de mandril estandarizadas, lo que permite una operación robótica de alta precisión. La aplicación de mandriles de remache de aleación de tungsteno en conexiones estructurales aeroespaciales demuestra la adaptabilidad de ingeniería de los materiales de las herramientas, mejorando la calidad de la conexión mediante la optimización del soporte y proporcionando un rendimiento fiable en ensamblajes estructurales ligeros.

### 7.2.1 Principios de selección de las tapas de remaches de aleación de tungsteno en el remachado de aleación de titanio

Los mandriles para remaches de aleación de tungsteno para el remachado de aleaciones de titanio se basan principalmente en la compatibilidad de dureza, la resistencia al impacto y la compatibilidad superficial. Estos principios garantizan que el mandril proporcione un soporte estable durante la deformación de remaches de titanio de alta resistencia, evitando daños o deformaciones irregulares. El principio de dureza requiere que la superficie de trabajo del mandril sea más dura que la de la aleación de titanio, y que el esqueleto de fase de tungsteno resista la indentación, lo que resulta en una menor indentación del mandril y una fuerza de reacción más uniforme. El principio de resistencia al impacto considera la alta resistencia requerida para los remaches de titanio y la alta densidad y fuerte inercia de las aleaciones de tungsteno, concentrando la transferencia de energía a través del mandril.

Los principios de selección también incluyen la compatibilidad superficial, un mandril liso para reducir la adhesión de virutas de titanio, la ausencia de riesgo de corrosión galvánica y el recubrimiento o pasivación del mandril. Los principios de tamaño incluyen la coincidencia con el diámetro del remache, un cuerpo del mandril ligeramente mayor para acomodar la cola y una concavidad moderada en la cara final para mayor atractivo estético. Los principios de durabilidad evalúan la vida útil; los mandriles de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aleación de tungsteno presentan buena tenacidad, retardan la fatiga y requieren menos reemplazos en el remachado de alta frecuencia.

El principio de estabilidad térmica se refleja en el remachado en caliente de remaches de titanio, donde el mandril se ablanda y mantiene su estabilidad dimensional. El principio de pureza química minimiza las impurezas, evitando la contaminación de la superficie del titanio. El principio de selección de mandriles para remaches de aleación de tungsteno en el remachado de aleación de titanio refleja la coordinación entre herramientas y materiales. Esta combinación basada en principios facilita la obtención de conexiones de alta resistencia y proporciona una guía de selección en estructuras aeroespaciales.

### **7.2.2 Requisitos para las propiedades superficiales de las tapas de remaches de aleación de tungsteno en el remachado de materiales compuestos**

Los requisitos de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno para el remachado de materiales compuestos se centran principalmente en la suavidad, el control de la fricción y el contacto no destructivo. Estos requisitos se deben a la sensibilidad de los materiales compuestos a los arañazos superficiales y la delaminación, lo que garantiza la integridad estructural tras el remachado. Se requiere una alta suavidad; la superficie de trabajo del mandril está pulida a espejo para reducir la rotura de las fibras o el daño a la resina, y para evitar el desprendimiento de partículas y la contaminación de la capa intermedia cuando se deforma la cola del remache.

Los requisitos de control de fricción se manifiestan en un bajo coeficiente de fricción, una superficie cepillada o revestida del expulsor y un deslizamiento suave para evitar que un par excesivo deforme la placa compuesta. Químicamente, el expulsor es altamente inerte, sin productos de reacción que afecten al curado de la resina. El requisito de no dañar la placa requiere una transición suave en la cara del extremo del expulsor, una distribución uniforme de la presión y la ausencia de hendiduras o microfisuras en el material compuesto cuando se apoya en el expulsor.

Los requisitos también incluyen una conductividad moderada, una rápida descarga electrostática del remache y la prevención de daños por chispas en la fibra de carbono. Se requiere una buena conducción térmica, con una rápida disipación del calor durante el remachado y un bajo aumento de temperatura en el remache para proteger la sensibilidad térmica del compuesto. La facilidad de limpieza también es esencial, sin residuos de resina adsorbidos en la superficie del remache. Las características superficiales de los remaches de aleación de tungsteno utilizados en el remachado de compuestos reflejan la interacción entre la herramienta y el material sensible. Sus características optimizadas facilitan la unión no destructiva, proporcionando protección superficial en estructuras de compuestos aeroespaciales.

### **7.2.3 Análisis de estabilidad de las tapas de remaches de aleación de tungsteno en entornos de vibración**

El análisis de estabilidad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno en entornos de vibración se centra principalmente en su comportamiento de respuesta bajo cargas mecánicas cíclicas. Este análisis

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

ayuda a comprender la retención de la forma y la fiabilidad del soporte del mandril durante el ensamblaje dinámico o el uso. Los entornos de vibración se observan comúnmente en las oscilaciones mecánicas durante el funcionamiento del equipo o el funcionamiento continuo en las líneas de ensamblaje. Como herramienta de soporte, el mandril debe soportar estas cargas sin deformarse ni dañarse significativamente. La estructura bifásica de la aleación de tungsteno se refleja en el análisis: el esqueleto de partículas de tungsteno proporciona rigidez para resistir la vibración, mientras que la fase aglutinante coordina la absorción de energía por microdeformación. La estabilidad general del mandril depende de la interacción entre las fases.

El proceso de análisis se simuló mediante pruebas de vibración. La varilla superior se fijó a una mesa vibratoria y se aplicaron diferentes frecuencias y amplitudes. Se registraron los cambios de desplazamiento y tensión. Una unión química interfacial más fuerte resultó en una disminución más rápida de la vibración y una menor tendencia de la varilla superior a resonar. El análisis de estabilidad evaluó la frecuencia de resonancia. Una gran relación de aspecto de la varilla superior indicó sensibilidad a bajas frecuencias; un diseño más corto y grueso optimizó la estabilidad. Los efectos térmicos acompañaron la vibración; la generación de calor por fricción fue mitigada por la conductividad térmica de la varilla superior, que ayudó a la disipación del calor, resultando en un aumento de temperatura más lento y una mejor estabilidad.

El análisis de vibraciones también incluye la acumulación de fatiga; bajo vibración cíclica, la propagación de microdaños en el mandril es lenta y la fase aglutinante se recupera rápidamente, lo que permite predecir la vida útil a partir del análisis. El análisis composicional también influye; el sistema níquel-cobre presenta buena amortiguación y alta absorción de vibraciones, mientras que los sistemas níquel-hierro demuestran alta resistencia y estabilidad. El análisis del tratamiento superficial potencia aún más este efecto; las texturas cepilladas dispersan la energía de la vibración, mejorando la estabilidad del mandril. La gestión de la pureza minimiza las impurezas, lo que resulta en menos puntos de inicio de defectos durante la vibración.

El análisis de estabilidad del mandril en condiciones de vibración guía el diseño; una cara plana proporciona un soporte uniforme, lo que resulta en una distribución uniforme de la tensión durante la vibración. El análisis del tratamiento térmico revela el impacto del recocido, que libera la tensión residual y mejora la estabilidad. El análisis de estabilidad de vibración de mandriles para remaches de aleación de tungsteno demuestra la evaluación de la respuesta dinámica del material, facilita la adaptación de la herramienta a la vibración mediante la simulación de carga y contribuye a la base analítica en el entorno de ensamblaje. La naturaleza sistemática del análisis permite predecir el rendimiento del mandril en condiciones de oscilación, lo que proporciona una vía de retroalimentación para la mejora del proceso.

#### **7.2.4 Requisitos especiales para remaches de aleación de tungsteno en procesos de remachado a baja temperatura**

Los requisitos especiales para los mandriles de remaches de aleación de tungsteno en procesos de remachado criogénico se centran principalmente en la tenacidad a baja temperatura y la estabilidad

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

dimensional. Estos requisitos se derivan de la mayor fragilidad y contracción de los materiales a bajas temperaturas, lo que garantiza un soporte fiable y una deformación coordinada del mandril durante el ensamblaje en frío. Los entornos de baja temperatura son comunes en almacenes criogénicos o en equipos de remachado de cadena de frío, donde el mandril debe resistir el riesgo de fractura frágil. La estructura bifásica de las aleaciones de tungsteno se refleja en estos requisitos: la fase de tungsteno presenta menor deslizamiento a bajas temperaturas, mientras que la fase aglutinante se extiende y coordina para mejorar la tenacidad. Los requisitos incluyen una temperatura de transición frágil baja, lo que garantiza que el mandril absorba más energía durante impactos a temperaturas bajo cero para evitar fracturas repentinas. Existen requisitos de composición especiales: los sistemas de níquel-cobre presentan buena tenacidad a baja temperatura y una alta resistencia al impacto en frío en el mandril; los sistemas de níquel-hierro requieren aditivos para regular la temperatura de transición. El tratamiento térmico requiere envejecimiento a baja temperatura para fortalecer los límites de grano mediante precipitación, lo que resulta en una baja tendencia a la fragilidad del mandril.

La estabilidad dimensional requiere una contracción mínima a baja temperatura, un bajo coeficiente de expansión térmica del mandril y un ajuste uniforme con el remache durante el soporte. Se requiere una superficie lisa para minimizar la fricción al soportar la deformación del remache a bajas temperaturas y para prevenir los efectos de la condensación y la congelación. La estabilidad química requiere resistencia al oxígeno a baja temperatura, sin corrosión por congelación en la superficie del mandril. Estos requisitos específicos para los mandriles de remaches de aleación de tungsteno en procesos de remachado a baja temperatura reflejan los requisitos del material para la adaptabilidad a entornos fríos. Su tenacidad y estabilidad respaldan el rendimiento de la herramienta a baja temperatura, lo que contribuye a los requisitos fundamentales del ensamblaje en frío.

### **7.3 Aplicación de varillas remachables de aleación de tungsteno en la fabricación de automóviles y transporte ferroviario**

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno se utilizan principalmente como herramientas de soporte para el remachado en la industria automotriz y del transporte ferroviario. Esta aplicación es evidente en las conexiones estructurales de carrocerías, cabinas o chasis, lo que permite lograr un remachado de alta resistencia en materiales ligeros. La industria automotriz prioriza la ligereza y la alta resistencia, mientras que el transporte ferroviario prioriza la durabilidad y la resistencia a las vibraciones. La alta densidad y dureza del mandril proporcionan una fuerza de reacción estable, y la estructura bifásica de la aleación de tungsteno coordina la deformación por impacto. Las aplicaciones incluyen el remachado de aleaciones de aluminio, placas de acero y materiales compuestos, con un diseño de la cara del extremo del mandril que se adapta al tipo de remache.

En las líneas de montaje de carrocerías, las varillas superiores permiten remaches autoperforantes o ciegos, lo que garantiza una resistencia de conexión uniforme y una larga resistencia al impacto. En la fabricación de vehículos ferroviarios, se utilizan para remachar acero inoxidable o aleaciones de aluminio, proporcionando un soporte estable en entornos con vibraciones. Presentan una buena estabilidad química, resistiendo los contaminantes del refrigerante y el aceite del taller. También demuestran una gran

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



compatibilidad con la automatización, con interfaces estandarizadas que permiten un funcionamiento fluido del robot. La aplicación de varillas superiores remachables de aleación de tungsteno en la fabricación de automóviles y vehículos ferroviarios demuestra la adaptabilidad de los materiales de las herramientas, mejorando la eficiencia de la conexión mediante la optimización del soporte y proporcionando un rendimiento fiable en el montaje de estructuras de transporte.

### **7.3.1 Adaptabilidad de las barras superiores de remaches de aleación de tungsteno en el remachado de carrocerías de vehículos ligeros**

En el remachado de carrocerías de vehículos ligeros, la adaptabilidad de las barras superiores de remaches de aleación de tungsteno se refleja principalmente en su capacidad para soportar remaches de aleación de aluminio o acero de alta resistencia. Esta adaptabilidad ayuda a reducir el peso manteniendo la resistencia de la conexión. Las carrocerías de vehículos ligeros suelen utilizar láminas de aluminio o materiales híbridos, y el remachado requiere controlar la deformación para evitar daños. La alta dureza de la barra superior resiste la presión de los remaches de aluminio, la superficie de trabajo lisa reduce los arañazos, el soporte es uniforme y la forma del remache es simétrica.

El mecanismo adaptativo se manifiesta en el equilibrio mecánico; la aleación de tungsteno tiene una densidad moderada, lo que concentra las fuerzas de reacción sin aumentar la carga del equipo; la inercia de la varilla superior facilita la transferencia de energía; y la cola del remache se expande suavemente. La fase adhesiva está coordinada con una deformación mínima, lo que resulta en una buena absorción de vibraciones durante el impacto de la varilla superior y evita tensiones adicionales en los paneles de la carrocería. La estabilidad química se adapta al refrigerante de la línea de montaje, y la superficie de la varilla superior está libre de corrosión que afecta la conexión. El diseño de la cara final es plano o ligeramente cóncavo, lo que permite el uso de remaches autoperforantes o macizos, lo que garantiza una alta precisión en el ajuste de la varilla superior. La adaptabilidad de las varillas superiores en el remachado ligero también incluye compatibilidad con la automatización, buena redondez de la varilla para una sujeción estable con robots y una larga vida útil en operaciones de alta frecuencia. Tras el tratamiento térmico, la microestructura es uniforme, la varilla superior presenta una alta resistencia a la fatiga y requiere menos reemplazos en líneas de producción continuas. La adaptabilidad al pulido de superficies es buena, la fricción es baja, el deslizamiento del remache es mínimo y la calidad del conformado es estable. La adaptabilidad de las varillas superiores de remache de aleación de tungsteno en el remachado ligero de carrocerías demuestra la coordinación de la herramienta con materiales que reducen el peso, lo que permite una unión ligera pero resistente en las conexiones de carrocerías mediante un soporte optimizado, lo que aporta valor práctico a la fabricación de automóviles.

### **7.3.2 Investigación sobre el comportamiento de desgaste de las varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno bajo el proceso de remachado de alta frecuencia**

La investigación sobre el comportamiento de desgaste de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno en el remachado de alta frecuencia se centra principalmente en la evolución del daño superficial bajo impactos rápidos y continuos. Esta investigación ayuda a comprender el rendimiento de

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

durabilidad de los mandriles en líneas de ensamblaje automatizadas de alto ritmo. El remachado de alta frecuencia implica frecuencias de impacto de decenas o incluso más por minuto, con la superficie de trabajo del mandril en contacto repetido con la cola del remache. La fricción y la acumulación de indentación conducen al desgaste. La estructura de doble fase de las aleaciones de tungsteno es evidente en el estudio: la alta dureza de las partículas de tungsteno resiste la indentación, mientras que la fase de unión coordina la microdeformación para absorber energía, lo que resulta en una morfología de desgaste uniforme y fina para el mandril.

La investigación se llevó a cabo mediante experimentos de simulación o monitoreo de la línea de producción. Se fijó una pistola remachadora de alta frecuencia con una varilla superior y se registraron la rugosidad de la superficie y la pérdida de volumen después del número de ciclos. Químicamente, la fase aglutinante se desgastó preferentemente, formando picaduras poco profundas. Después de que las partículas de tungsteno quedaron expuestas, la acción abrasiva se ralentizó. El comportamiento del desgaste fue escalonado: inicialmente, la superficie pulida era lisa y el desgaste fue lento; en la etapa intermedia, se acumularon micropicaduras, aumentando la rugosidad; y en la etapa posterior, la tasa de desgaste se estabilizó. Efectos térmicos acompañados de alta frecuencia: la generación de calor por fricción aceleró el desgaste oxidativo, mientras que la conducción de calor de la varilla superior ayudó a la disipación de calor, mitigando el desgaste.

La investigación del proceso de alta frecuencia también evaluó la influencia de la forma de la cara final. Las superficies cóncavas exhiben una distribución de desgaste más amplia debido a la deformación, mientras que las superficies planas muestran un desgaste temporal pero uniforme. Se evaluó la efectividad del tratamiento de la superficie; el enchapado o endurecimiento resultó en un bajo desgaste inicial, pero más tarde, con el sustrato expuesto, el comportamiento del desgaste se revirtió. Se consideraron las diferencias de composición: los sistemas de tungsteno-cobre mostraron buena conductividad térmica y bajo impacto térmico en el desgaste, mientras que los sistemas de níquel-hierro exhibieron alta dureza y fuerte resistencia a la abrasión. El proceso de remachado de alta frecuencia proporcionó una perspectiva de daño de carga continua para examinar el comportamiento del desgaste de los mandriles de remache de aleación de tungsteno. El análisis del comportamiento respaldó la evaluación de la vida útil de la herramienta y contribuyó con referencias de durabilidad en el ensamblaje automatizado.

### **7.3.3 Compatibilidad de las tapas de remaches de aleación de tungsteno en conexiones multimateriales**

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno en conexiones multimaterial se reflejan principalmente en su adaptabilidad a diferentes materiales de remache y chapa metálica. Esta compatibilidad es evidente en el remachado de estructuras híbridas, como las conexiones de aluminio-acero o de materiales compuestos de aluminio, lo que garantiza un soporte estable y sin daños del mandril. Esta compatibilidad se debe al equilibrio entre la dureza del mandril y el acabado superficial: la alta dureza de la aleación de tungsteno resiste la indentación de los remaches de acero, mientras que la superficie lisa reduce los arañazos en las placas de aluminio o de materiales compuestos. Químicamente,

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

el mandril es altamente inerte, sin acoplamiento galvánico ni reacción que afecte la interfaz entre materiales diferentes.

El mecanismo de compatibilidad se refleja en la coordinación de la deformación: cuando la superficie de trabajo del mandril entra en contacto con un remache blando, la fuerza de reacción se mitiga, evitando que la capa compuesta se aplaste; al usar un remache duro, este exhibe alta rigidez, resultando en una deformación concentrada y un buen conformado. El diseño de la cara final es compatible con diversas aplicaciones, con áreas cóncavas poco profundas que acomodan la expansión del remache de aluminio y superficies planas que proporcionan soporte temporal al remache de acero. La compatibilidad con la conducción térmica garantiza una rápida disipación del calor, y el mandril mantiene un aumento de temperatura estable a pesar de la generación de calor variable de los diferentes materiales. La compatibilidad con el tratamiento superficial garantiza recubrimientos flexibles, y el contacto del mandril con la resina compuesta está libre de contaminación.

La compatibilidad de los mandriles en la unión de múltiples materiales también evalúa la respuesta a la vibración. Las estructuras híbridas presentan vibraciones complejas, y los mandriles con amortiguación coordinada minimizan los daños. La estabilidad química garantiza la compatibilidad con los medios de limpieza, evitando que los productos de corrosión contaminen la zona de unión. La compatibilidad y el ajuste de la composición, con la conductividad tungsteno-cobre que facilita la descarga electrostática, los hacen adecuados para compuestos de fibra de carbono. La compatibilidad de los mandriles de remache de aleación de tungsteno en la unión de múltiples materiales demuestra la adaptabilidad de la herramienta a materiales diferentes. Gracias a su dureza y acabado superficial coordinados, facilitan el remachado fiable de estructuras híbridas, lo que sienta las bases para la compatibilidad en la fabricación ligera.

#### **7.4 Aplicación de varillas remachables de aleación de tungsteno en ensamblajes mecánicos de precisión**

Los mandriles de remache de aleación de tungsteno se utilizan principalmente en el ensamblaje mecánico de precisión como herramientas de soporte para remaches de miniatura o de alta precisión. Esta aplicación es evidente en conexiones estructurales en campos como la instrumentación, los dispositivos médicos y los equipos ópticos, ayudando a fijar de forma fiable componentes pequeños. El ensamblaje mecánico de precisión prioriza conexiones sin daños, una deformación precisa y una consistencia dimensional. La alta dureza y la superficie lisa del mandril proporcionan una fuerza de reacción estable, mientras que la estructura de doble fase de la aleación de tungsteno mitiga los microimpactos, evitando arañazos o la concentración de tensiones en los componentes.

En aplicaciones, el mandril tiene un diámetro pequeño y una superficie de trabajo pulida a espejo, lo que garantiza una distribución uniforme de la presión al sujetar microrremaches. Presenta una gran estabilidad química, lo que lo hace resistente a entornos de sala limpia y evita el desprendimiento de partículas que podrían contaminar las piezas de precisión. Compatible con pistolas de remachado de precisión manuales y eléctricas, la interfaz miniaturizada del mandril permite un funcionamiento flexible. La aplicación de mandriles de remache de aleación de tungsteno en ensamblajes mecánicos de precisión

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

demuestra la adaptación precisa de los materiales de las herramientas, mejorando la calidad de las conexiones pequeñas mediante un soporte optimizado y proporcionando un rendimiento fiable en la fabricación de alta precisión.

#### **7.4.1 Requisitos para la precisión dimensional de las barras superiores de remaches de aleación de tungsteno en el microrremachado**

Los requisitos para los mandriles de remaches de aleación de tungsteno en el microrremachado se centran principalmente en el diámetro del mandril, la planitud de la superficie de trabajo y la coaxialidad. Estos requisitos garantizan un posicionamiento preciso y una presión uniforme del mandril al sujetar remaches pequeños, evitando la deformación o el desplazamiento de los componentes de precisión. El diámetro del mandril debe coincidir con la cola del microrremache con una desviación mínima para asegurar un ajuste perfecto. Químicamente, una superficie lisa reduce la fricción y una alta precisión dimensional permite la formación simétrica de remaches. La planitud requiere una superficie de trabajo lisa, sin puntos altos localizados durante el soporte y sin hendiduras en los componentes de los instrumentos de precisión.

El mecanismo debe reflejarse en el control de tolerancia, con una alta coaxialidad del cuerpo de la varilla para evitar cargas excéntricas y una distribución uniforme de la tensión durante el impacto. Se requiere una precisión de longitud constante, el pasador expulsor debe estar posicionado de forma estable en el equipo y su posición debe permanecer inalterada durante remachados repetidos. Se requiere una alta estabilidad dimensional después del tratamiento térmico, con una contracción térmica mínima del pasador expulsor, y la precisión debe mantenerse a pesar de las fluctuaciones de temperatura del entorno de ensamblaje.

Los requisitos de precisión dimensional para los mandriles en microrremachado también incluyen el control de la forma de la cara final, la conformación precisa de cabezas cóncavas o planas poco profundas y la capacidad de adaptarse a la expansión del microrremachado sin rebosamiento. La baja rugosidad superficial requiere precisión auxiliar, y la baja fricción del mandril garantiza una deformación suave. La gestión de la pureza química minimiza las impurezas y garantiza un procesamiento dimensional consistente. Los requisitos de precisión dimensional para los mandriles de remaches de aleación de tungsteno en microrremachado reflejan las limitaciones geométricas de las herramientas de precisión. La optimización de la precisión facilita la realización fiable de conexiones pequeñas y contribuye a la base dimensional del ensamblaje del instrumento.

#### **7.4.2 El papel de la modificación de la superficie en la aplicación de precisión de mandriles de remaches de aleación de tungsteno**

La modificación de la superficie en aplicaciones de precisión de mandriles de remaches de aleación de tungsteno se logra principalmente mediante recubrimiento, pasivación o microtexturizado. Este proceso mejora la estabilidad de la superficie y la adaptabilidad funcional del mandril en remachados de alta precisión. Las aplicaciones de precisión priorizan el contacto no destructivo y la suavidad a largo plazo. La modificación de la superficie forma una capa protectora que bloquea químicamente la corrosión

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

ambiental, ralentiza el desgaste de la superficie de trabajo del mandril y facilita la formación suave de remaches. Los recubrimientos como el níquel-fósforo o el cromo-nitrógeno aumentan la dureza, ayudando al mandril a resistir la presión de los microrremaches, y la baja rugosidad superficial reduce los arañazos.

El efecto de la modificación se refleja en el control de la fricción, lo que resulta en un bajo coeficiente de fricción superficial, menor deslizamiento entre el expulsor y el remache, y una deformación uniforme de las piezas de precisión. Ya sea que la capa de pasivación sea autogenerada o artificial, el expulsor se oxida lentamente en una sala limpia húmeda, manteniendo un acabado liso. La modificación de microtextura dispersa la luz, reduciendo el deslumbramiento durante el funcionamiento del expulsor y mejorando la comodidad visual. La estabilidad química mejorada después de la modificación hace que el expulsor sea resistente a los agentes de limpieza, lo que garantiza la ausencia de contaminación residual durante el ensamblaje de precisión.

La modificación de la superficie también afecta la gestión térmica: la conductividad térmica del recubrimiento favorece la disipación del calor y ralentiza el aumento de temperatura del expulsor, protegiendo así los componentes sensibles al calor. El control del espesor de la modificación garantiza la precisión dimensional del expulsor. En aplicaciones de precisión, la modificación optimiza el contacto y la contención de microrremaches en el expulsor evita el desbordamiento. La función de la modificación de la superficie en la aplicación precisa de expulsores de remaches de aleación de tungsteno demuestra la refinada contribución de la ingeniería de superficies, que refuerza el rendimiento superficial de la herramienta mediante una capa protectora y proporciona una base estable para un ensamblaje de alta precisión.

#### **7.4.3 Requisitos del entorno de sala limpia para la pureza del material de la varilla superior del remache de aleación de tungsteno**

Los requisitos de pureza para las varillas de remache de aleación de tungsteno en salas blancas se deben principalmente a la necesidad de evitar el desprendimiento de partículas y la contaminación química. Este requisito es evidente en el remachado de instrumentos de precisión o dispositivos médicos, lo que garantiza que las varillas no introduzcan impurezas que puedan afectar la limpieza del ensamblaje. En salas blancas de alta exigencia, los materiales de las varillas deben tener una baja emisión de polvo. Los procesos de pulvimetalurgia de aleaciones de tungsteno purifican las impurezas y, químicamente, el bajo contenido de oxígeno y carbono reduce el desprendimiento de óxido, lo que resulta en una superficie de la varilla libre de partículas sueltas.

El mecanismo de demanda se refleja en la limpieza de la superficie; tras el pulido, el expulsor deja un mínimo de residuos, lo que reduce el riesgo de desprendimiento durante el funcionamiento. Presenta una alta pureza de componentes, sin elementos volátiles en la fase aglutinante, lo que garantiza la estabilidad a altas temperaturas o al vacío. El tratamiento térmico requiere recocido al vacío para eliminar por completo las impurezas gaseosas internas, evitando su liberación durante el uso. La limpieza química requiere disolventes suaves, lo que facilita la eliminación de residuos de la superficie del expulsor.

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



Los requisitos para las varillas superiores en entornos de sala limpia también incluyen variantes no magnéticas; el sistema de tungsteno-cobre evita la adsorción de polvo magnético. El recubrimiento requiere materiales inertes para evitar el desprendimiento de la capa protectora de la varilla superior. Los requisitos de pureza se evalúan mediante pruebas de emisión de polvo; la varilla superior presenta mínimas partículas de vibración o fricción para cumplir con los estándares requeridos. Los requisitos de pureza para las varillas superiores de remaches de aleación de tungsteno en entornos de sala limpia reflejan las limitaciones de material para un ensamblaje de alta limpieza. La purificación facilita el rendimiento sin contaminación de la herramienta y contribuye a una base limpia en entornos de precisión.



CTIA GROUP LTD Varilla superior con remache de aleación de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Capítulo 8 Problemas comunes con las tapas de remaches de aleación de tungsteno

### 8.1 Formación de defectos en el proceso de fabricación de remaches de aleación de tungsteno

Los mandriles para remaches de aleación de tungsteno, durante su fabricación, se deben principalmente a fluctuaciones del proceso en las distintas etapas de la pulvimetalurgia. Estos defectos afectan la uniformidad de la microestructura del mandril y la consistencia de sus propiedades mecánicas. Entre los defectos se incluyen la porosidad residual, la segregación de partículas, las grietas y las inclusiones, originadas desde la mezcla de la materia prima hasta el tratamiento posterior a la sinterización. La mezcla no homogénea provoca un enriquecimiento localizado de la fase aglutinante, la compresión por gradiente de tensión induce la delaminación y las desviaciones en la ventana de temperatura de sinterización resultan en una reorganización insuficiente o un flujo excesivo.

El mecanismo de formación de defectos se manifiesta en la interacción interfacial. Cuando las partículas de tungsteno no se humedecen lo suficiente con la fase aglutinante, se forman numerosos poros interfaciales y, químicamente, las impurezas reaccionan con el oxígeno y el carbono para generar poros cerrados por el gas. La liberación inadecuada de la tensión térmica provoca microfisuras, y la relación de aspecto en forma de varilla de la varilla superior amplifica los defectos finales. El control de defectos se logra mediante la optimización de parámetros y procesos auxiliares, como el fresado de bolas que mejora la uniformidad y el prensado isostático en caliente que cierra los poros.

El análisis de defectos durante el proceso de fabricación orienta la mejora de la calidad; la observación microscópica y las pruebas de densidad revelan problemas; y el rendimiento del mandril proporciona información para realizar ajustes al proceso. La formación de defectos en la fabricación de mandriles para remaches de aleación de tungsteno demuestra los desafíos de la pulvimetalurgia. El control de procesos facilita la producción fiable de herramientas y sienta las bases de calidad para las aplicaciones de remachado.

#### 8.1.1 Influencia de la sinterización desigual en la microestructura de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno

La falta de homogeneidad en la sinterización de la microestructura de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se manifiesta principalmente en el gradiente de densidad y la desviación de la distribución de fase. Este efecto es más pronunciado en las dimensiones largas del tocho del mandril, lo que afecta la consistencia de la resistencia general y la resistencia al impacto. La falta de homogeneidad en la sinterización se debe a las fluctuaciones del campo de temperatura o de la atmósfera, el momento de aparición de la fase líquida entre el centro y el borde del tocho, y el grado de reorganización. En zonas con flujo insuficiente de fase líquida, las partículas de tungsteno presentan menos contacto y más poros residuales.

El mecanismo de influencia se refleja en la reorganización de las partículas. En la región no uniforme, las partículas de tungsteno presentan una esferoidización deficiente, concentración de tensiones en las

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

esquinas agudas y una alta fragilidad local del mandril. La región de segregación de la fase aglutinante presenta buena tenacidad, pero baja resistencia, lo que resulta en fluctuaciones en las propiedades axiales del mandril. La unión interfacial no homogénea y los espesores variables en la zona de difusión química aumentan el riesgo de separación del mandril por impacto. Tras el trabajo en caliente, la no uniformidad se intensifica, la textura de la fibra se vuelve discontinua y la resistencia a la flexión del mandril disminuye.

Los efectos de la falta de homogeneidad de la sinterización también incluyen diferencias en el tamaño del grano, lo que resulta en un engrosamiento en la zona de alta temperatura y granos más finos en la zona de baja temperatura, lo que lleva a más puntos de iniciación de grietas por fatiga en el mandril. La volatilización desigual de impurezas exagera el impacto, causando la formación localizada de la fase de fragilización en el mandril. El análisis de la distribución de la densidad a través de la observación metalográfica transversal guía el control de la temperatura del horno multizona. El impacto de la falta de homogeneidad de la sinterización en la microestructura de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno demuestra el desafío de lograr uniformidad en el proceso de alta temperatura. La optimización de campo apoyó la formación confiable de la microestructura, contribuyendo a una base estructural para la durabilidad de la herramienta.

### **8.1.2 Fuentes y control de la contaminación por impurezas en mandriles de remaches de aleación de tungsteno**

La contaminación en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se origina principalmente en el polvo de la materia prima, la atmósfera del proceso y el contacto con el equipo. Esta contaminación afecta la pureza y la microestructura del mandril, pudiendo causar fragilidad o defectos de corrosión. Las fuentes de contaminación de la materia prima incluyen oxígeno y carbono residuales, la reducción incompleta del polvo de tungsteno, que conduce a la formación de óxido, y la adsorción de gases por el polvo de la fase aglutinante. Las fuentes de contaminación de la atmósfera del proceso incluyen el alto punto de rocío de hidrógeno y la reacción del vapor de agua, que generan químicamente fases volátiles de celda cerrada o fragilizadas.

Las fuentes de contaminación también incluyen el desgaste del equipo y la caída de partículas de moldes o embarcaciones en la palanquilla. Los residuos de los medios de molienda de bolas y las zonas duras localizadas en la varilla eyectora también contribuyen. Las medidas de control incluyen la purificación de la materia prima, la reducción multietapa del polvo de tungsteno para reducir el oxígeno y la limpieza química del polvo de aleación para eliminar las impurezas superficiales. El control atmosférico implica el secado y la filtración con hidrógeno, con un punto de rocío bajo para evitar la reoxidación. Las variantes de sinterización al vacío reducen la contaminación por gases, lo que resulta en una alta limpieza de la varilla eyectora.

Las medidas de control también incluyen la gestión de equipos, el uso de materiales inertes para revestimientos de moldes y el uso de recipientes de alta pureza para evitar el desprendimiento. La mezcla con materiales sin medios o bolas de cerámica minimiza la introducción de contaminantes. La limpieza

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



química posterior al tratamiento térmico elimina los residuos volátiles. Las fuentes y el control de impurezas en los expulsores de remaches de aleación de tungsteno incorporan los principios de la ingeniería de materiales para la gestión de la pureza. El control multifuente garantiza la limpieza del material, sentando las bases para el rendimiento del expulsor. La naturaleza sistemática de estos controles garantiza la consistencia de las impurezas del expulsor entre lotes, garantizando así la pureza y la durabilidad.

### 8.1.3 Mecanismo de iniciación de grietas durante la etapa de prensado del mandril de remache de aleación de tungsteno

El mecanismo de inicio de grietas en la etapa de prensado de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno implica principalmente la concentración de tensiones y la descoordinación de la deformación entre las partículas de polvo. Este mecanismo se manifiesta durante el conformado en verde y afecta la sinterización posterior y la integridad del producto terminado. Durante el proceso de prensado, el polvo llena el molde, y la reorganización de las partículas y la deformación plástica se producen durante la transmisión de la presión. El polvo de tungsteno presenta una alta dureza y una alta resistencia a la deformación. Químicamente, la fricción entre partículas genera una tensión cortante local, y el gradiente de tensión en los bordes o esquinas es pronunciado, lo que provoca la aparición de microgrietas.

El mecanismo se divide en etapas. En la etapa inicial, la tensión de compresión elástica es uniforme. En la etapa intermedia, aumenta la fricción deslizante de las partículas y se inician grietas en las juntas de interfaz débiles. En la etapa posterior de compactación, se produce el efecto de recuperación elástica y la liberación de tensión en el extremo del mandril con mayor relación de aspecto es desigual, lo que provoca la propagación de grietas superficiales. Una lubricación insuficiente agrava el mecanismo, lo que resulta en una alta tensión de tracción y numerosas grietas debido a la adherencia de las partículas al molde. El tamaño desigual de las partículas de polvo afecta al mecanismo, con un llenado deficiente de los huecos debido a la mezcla de partículas gruesas y finas, y numerosos puntos de concentración de tensión. El mecanismo de iniciación de grietas también se ve afectado por el método de prensado. El prensado isostático en frío con presión de líquido uniforme produce menos grietas, mientras que el moldeo con un gran gradiente de presión unidireccional las produce con facilidad. El mecanismo cambia con el aumento de la temperatura; el prensado en caliente ablanda el aglutinante, lo que resulta en una mejor coordinación y menos grietas. La gestión de la pureza química reduce las impurezas y las partículas frágiles, reduciendo así la fuente de iniciación. El mecanismo de iniciación de grietas en la etapa de prensado del mandril de remache de aleación de tungsteno refleja la respuesta del material a la tensión de conformado. El control de la presión contribuye a la integridad de la pieza en bruto y a la comprensión del mecanismo en la optimización del proceso.

### 8.1.4 Análisis de las causas de los residuos de porosidad en las barras superiores de remaches de aleación de tungsteno

El análisis de las causas de los residuos de porosidad en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se centra principalmente en el confinamiento de gas y el llenado insuficiente de partículas

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durante las etapas de prensado y sinterización. Esto provoca una densidad desigual del mandril y una reducción localizada de la resistencia. Durante la etapa de prensado, el aire o el gas adsorbido entre las partículas de polvo se comprime y sella, y químicamente, el vapor de agua o el hidrógeno residual forman poros cerrados. La porosidad es mayor cuando la densidad del cuerpo verde es baja. La amplia distribución del tamaño de partícula es una causa clara; las partículas gruesas presentan grandes huecos y son difíciles de rellenar, mientras que el polvo fino actúa como puente entre el gas confinado. Otras causas incluyen una reorganización insuficiente de la sinterización, un movimiento limitado de las partículas cuando la fase líquida es pequeña, una lenta contracción de los poros y una mayor cantidad de poros residuales. Una ventana de baja temperatura es una causa importante, indicando una fusión incompleta y una humectación deficiente de la fase aglutinante. Un punto de rocío atmosférico elevado agrava la causa, ya que el vapor de agua reacciona para formar volátiles, dejando poros residuales. La varilla superior, larga y en forma de varilla, amplifica la causa, con un flujo lento de la fase líquida y poros concentrados en sus extremos.

El análisis de las causas de la porosidad residual evalúa el impacto de los procesos: el prensado isostático en caliente reduce los poros cerrados, y la compresión mecánica durante la represurización reduce aún más la porosidad residual. La gestión de la pureza química minimiza la volatilización de impurezas y reduce las fuentes de porosidad. El análisis del origen guía la optimización; la prepresurización y el venteo reducen las emisiones de gases, y el aislamiento prolongado promueve la contracción. El análisis de las causas de la porosidad residual en mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una perspectiva material sobre los defectos volumétricos, facilita la mejora de los procesos de densificación mediante el rastreo de las causas y aporta una base analítica para la calidad del mandril.

## 8.2 Modos de falla de las tapas de remaches de aleación de tungsteno en uso

Durante el uso, los mandriles de remaches de aleación de tungsteno presentan principalmente fractura por sobrecarga mecánica, acumulación de desgaste y daño por fatiga. Estos modos se manifiestan en entornos de remachado de alta frecuencia o carga pesada, lo que afecta la estabilidad del soporte y la vida útil del mandril. Los modos de fallo se originan por la interacción repetida entre el mandril y la cola del remache, resultante de los efectos combinados de la tensión mecánica, el calor por fricción y los factores ambientales. El modo de sobrecarga se manifiesta como una fractura repentina, el modo de desgaste implica la eliminación de material superficial y el modo de fatiga implica la propagación de microdaños.

El análisis de modos se realizó mediante la observación de la superficie de fractura y la medición del desgaste. La estructura bifásica del mandril influye en la trayectoria de falla: las partículas de tungsteno resisten el daño, mientras que la fase aglutinante coordina la deformación, pero es propensa a la fatiga. La oxidación química de la superficie acelera el desgaste y la corrosión del medio exacerba la falla. El estudio de los modos de falla guía la selección y el mantenimiento del mandril; los mandriles de alta resistencia resisten la sobrecarga y los resistentes al desgaste tienen una larga vida útil. Los modos de falla de los mandriles de remache de aleación de tungsteno en uso reflejan el comportamiento del material

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



en la respuesta a la carga de la herramienta. El análisis de modos facilita la optimización de la durabilidad y proporciona una referencia para la prevención de fallas en la práctica del remachado.

### 8.2.1 Mecanismo de fractura del mandril de remache de aleación de tungsteno debido a sobrecarga mecánica

Los mandriles de remaches de aleación de tungsteno, debido a la sobrecarga mecánica, se dañan principalmente bajo altas tensiones instantáneas. Este mecanismo se manifiesta durante impactos fuertes accidentales o fallos del equipo, donde el mandril, como componente de soporte, soporta una carga que excede su capacidad de diseño. El mecanismo comienza con la concentración de tensiones, donde la deformación local es importante en la superficie de trabajo o en la esquina del mandril. Químicamente, la fase aglutinante experimenta primero la deformación plástica, y el esqueleto de partículas de tungsteno soporta la carga principal. La sobrecarga aumenta la acumulación de dislocaciones, incrementa la tensión interfacial y se inician microfisuras en la fase aglutinante o entre las partículas.

El mecanismo de fractura se desarrolla en etapas: inicialmente, la energía se absorbe a través de la coordinación dúctil; en la etapa intermedia, las grietas se propagan a lo largo de interfaces débiles, con la estructura de dos fases de la barra superior que ralentiza la propagación a través de la flexión; en la etapa posterior, se produce una fractura rápida, con la superficie de fractura mostrando una mezcla de hoyuelos y clivaje, la fase aglutinante exhibiendo hoyuelos profundos y la fase de tungsteno mostrando superficies de clivaje planas. Los efectos térmicos, acompañados de sobrecarga, causan calentamiento por fricción, ablandando la fase aglutinante y acelerando la fractura. Debido a las diferencias en la composición, el sistema níquel-cobre exhibe coordinación dúctil y fractura más lenta, mientras que el níquel-hierro exhibe mayor resistencia pero una tendencia ligeramente más fuerte hacia la fractura frágil.

El mecanismo de fractura por sobrecarga mecánica también se ve influenciado por el estado de la superficie; los mandriles de remache lisos presentan una tensión uniforme y una iniciación tardía de grietas, mientras que las rayaduras provocan una iniciación temprana de grietas. Los mecanismos optimizados de tratamiento térmico resultan en una baja tensión residual tras el recocido y una buena tolerancia a la sobrecarga. La pureza química controlada minimiza las impurezas y reduce los puntos de iniciación frágiles. El mecanismo de fractura por sobrecarga mecánica de los mandriles de remache de aleación de tungsteno refleja la falla del material en respuesta a cargas elevadas. El análisis de trayectorias facilita la evaluación de la carga de la herramienta y contribuye a la comprensión mecanicista de la seguridad del remachado.

### 8.2.2 Efectos acumulativos del desgaste y la fatiga en las partes superiores de los remaches de aleación de tungsteno

El efecto acumulativo del desgaste y la fatiga en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se logra principalmente a través del efecto sinérgico del contacto repetido y la tensión cíclica. Este efecto se manifiesta gradualmente en el remachado de alta frecuencia, afectando el acabado superficial y la durabilidad general del mandril. La acumulación de desgaste conduce a la eliminación de material de la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

superficie, mientras que la acumulación de fatiga conduce a la propagación de microdaños, y los dos interactúan para acelerar el fallo. En las primeras etapas del desgaste, la fricción raya la superficie de trabajo, ablandando y transfiriendo químicamente la fase aglutinante y exponiendo las partículas de tungsteno a la acción abrasiva. En las primeras etapas de la fatiga, las dislocaciones se acumulan y las microfisuras se inician durante la oscilación cíclica. En la estructura de dos fases del mandril, la fase aglutinante se fatiga primero.

El mecanismo de efecto acumulativo se manifiesta en la interacción: las superficies desgastadas y rugosas presentan más puntos de concentración de tensiones, lo que provoca la rápida aparición de grietas por fatiga; las microfisuras por fatiga exponen nuevas superficies, acelerando el desgaste. Los efectos térmicos acumulativos incluyen la generación de calor por fricción, que reblandece la superficie y aumenta el desgaste, mientras que el aumento de la temperatura del expulsor promueve la fatiga. Factores ambientales acumulados, como la corrosión sinérgica en medios húmedos, también contribuyen al rápido daño del expulsor.

La acumulación de desgaste y fatiga también se ve afectada por la frecuencia de uso, con un efecto significativo a altas frecuencias, lo que resulta en picaduras profundas y numerosas grietas en la superficie del remache. El tratamiento superficial ralentiza la acumulación, y los recubrimientos proporcionan un bajo desgaste inicial y una buena protección contra la fatiga. Las diferencias de composición también contribuyen a la acumulación de desgaste; el tungsteno-cobre presenta una disipación de calor y una acumulación de desgaste más lentas, mientras que el níquel-hierro, con su alta dureza, resulta en un desgaste más lento. El efecto acumulativo del desgaste y la fatiga en remaches de aleación de tungsteno refleja el daño sinérgico de las cargas a largo plazo. El análisis de efectos facilita la gestión de la vida útil de la herramienta y proporciona una referencia acumulativa para el mantenimiento del remachado.

### **8.2.3 La reducción de la vida útil de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno debido a entornos corrosivos**

La reducción en la vida útil de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno debido a entornos corrosivos se logra principalmente a través de la disolución de los materiales de la superficie y la acumulación de daño estructural. Esta reducción es particularmente notable en talleres húmedos o tratados químicamente, donde el acabado superficial del mandril disminuye, afectando la estabilidad del soporte. Los entornos corrosivos incluyen humedad, niebla salina o agentes de limpieza. Químicamente, los elementos de la fase aglutinante son altamente reactivos y reaccionan fácilmente con el medio para formar capas disueltas o porosas, lo que gradualmente conduce a picaduras en la superficie del mandril. El mecanismo de reducción también se observa en microceldas, donde la fase aglutinante sufre disolución anódica, mientras que la fase de tungsteno, aunque relativamente inerte, exhibe propagación de corrosión en la interfaz, lo que resulta en un adelgazamiento localizado del mandril.

El proceso de reducción de la corrosión se realiza por fases. En la etapa inicial, se destruye la capa de pasivación superficial y la velocidad de corrosión es lenta. En la etapa intermedia, se produce corrosión

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

por picaduras o uniforme, lo que aumenta la rugosidad del expulsor y la fricción. En la etapa posterior, el daño se acumula, lo que resulta en una fuerza de reacción desigual del expulsor y una formación deficiente del remache. La humedad elevada acelera la corrosión, ya que promueve la migración de iones. Los medios ácidos producen una corrosión significativa, con una rápida disolución de la fase aglutinante. Los medios alcalinos son relativamente suaves, pero la exposición prolongada produce una capa porosa. Los efectos térmicos acompañan a la corrosión; al aumentar la temperatura, aumenta la velocidad de reacción, acortando la vida útil del expulsor.

Los entornos corrosivos también reducen la vida útil de los componentes internos, lo que provoca la concentración de tensiones en las picaduras y la aparición prematura de grietas por fatiga. El tratamiento superficial reduce la vida útil de forma más gradual, mientras que los recubrimientos aíslan el medio y mejoran la durabilidad del remache. Las diferencias de composición contribuyen a esta reducción; el sistema tungsteno-cobre mejora la conductividad, pero la fase de cobre es más propensa a la corrosión, mientras que el níquel-hierro proporciona una buena pasivación. La reducción de la vida útil de los remaches de aleación de tungsteno debido a entornos corrosivos refleja el consumo de material causado por la interacción con el medio, facilita la evaluación de la vida útil de la herramienta mediante la acumulación de daños y proporciona una referencia ambiental para las prácticas de mantenimiento.

#### **8.2.4 Agrietamiento de mandriles de remaches de aleación de tungsteno causado por choque térmico**

El agrietamiento de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno causado por choque térmico se debe principalmente a la concentración de tensión térmica bajo cambios bruscos de temperatura. Este fenómeno se manifiesta en el remachado en caliente o en condiciones de temperatura alterna, donde la propagación de microfisuras en el mandril o en su interior afecta su durabilidad. Durante el proceso de choque térmico, el rápido calentamiento y enfriamiento, junto con la diferencia de expansión térmica, genera tensiones de tracción y compresión. La falta de correspondencia entre los coeficientes de la fase aglutinante y la fase de tungsteno provoca una alta tensión interfacial y el inicio del agrietamiento. El agrietamiento se produce en etapas: inicialmente, la tensión térmica es elástica y el mandril permanece intacto; en la etapa intermedia, los impactos repetidos acumulan tensión residual y se inician microfisuras en la superficie o en la zona aglutinante; en la etapa posterior, las grietas se propagan, provocando la fractura del mandril o el desconchado de la superficie de trabajo. El calentamiento por fricción y los fuertes impactos locales aumentan la tendencia al agrietamiento. La microestructura también influye: los granos gruesos son más propensos al agrietamiento, mientras que los granos finos amortiguan la tensión con mayor eficacia.

El agrietamiento por choque térmico también se ve influenciado por el medio; la condensación de humedad exacerba la tensión, y los ciclos de humedad-calor del mandril aceleran el agrietamiento. Los fenómenos de la condición superficial también son relevantes; una capa de óxido suelta provoca más puntos de inicio de grietas. Las diferencias de composición también influyen; las fases de cobre presentan una rápida conductividad y disipación térmica, lo que resulta en un agrietamiento más lento, mientras que las fases de hierro muestran una regulación estable de la expansión. El agrietamiento inducido por

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

choque térmico en mandriles de remaches de aleación de tungsteno demuestra un comportamiento de daño sensible a la temperatura. El análisis de tensiones facilita la adaptación térmica de la herramienta y contribuye a la comprensión del fenómeno en operaciones a temperatura variable.

### 8.2.5 Influencia del desprendimiento de la superficie en la función de los remachadores de aleación de tungsteno

La influencia del desconchado superficial en el funcionamiento de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se debe principalmente a la separación de las capas de material, lo que genera superficies de contacto irregulares y un soporte inestable. Este efecto se manifiesta tras la fricción de alta frecuencia o la acumulación de fatiga, y el daño a la superficie de trabajo del mandril reduce la calidad del remache. El desconchado se origina por fatiga superficial o desgaste adhesivo, capas de óxido o transferencia desprendidas químicamente, y desprendimiento bajo cargas cíclicas. Inicialmente, la superficie es rugosa, lo que dificulta el deslizamiento del remache debido al ascenso por fricción del mandril; en la etapa intermedia, se forman picaduras de desconchado y las fuerzas de reacción irregulares provocan la deflexión del remache.

El mecanismo de influencia se refleja en la acumulación de daños, con microfisuras que se extienden a la capa superficial y provocan desprendimiento, lo que reduce el acabado superficial y dificulta la limpieza. Los efectos térmicos influyen en el desprendimiento; el aumento de temperatura ablanda la fase aglutinante, lo que resulta en un desprendimiento rápido. El medio afecta la capa de corrosión, haciéndola más flexible y fácil de desprender. La composición influye en el desprendimiento; las fases de cobre tienden a adherirse y transferirse con mayor facilidad, lo que resulta en un desprendimiento más fuerte, mientras que las fases de níquel son más estables y se desprenden más lentamente.

La influencia del desconchado superficial en el funcionamiento del mandril se extiende a la precisión; tras el desconchado, los cambios dimensionales provocan un soporte impreciso. El mantenimiento se ve significativamente afectado, ya que los mandriles desconchados requieren pulido o sustitución. El tratamiento superficial afecta al desconchado, retrasando el proceso de endurecimiento y mejorando la durabilidad del mandril. El impacto del desconchado superficial en el funcionamiento de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno refleja la degradación del rendimiento causada por el daño superficial. El análisis del desconchado facilita la gestión de la superficie de las herramientas y contribuye a la referencia del impacto en la durabilidad del remachado.

### 8.3 Optimización del rendimiento y diagnóstico de fallas en remaches de aleación de tungsteno

Los mandriles para remaches de aleación de tungsteno se obtienen principalmente mediante el ajuste de la composición, la mejora del proceso y las pruebas no destructivas. Esta optimización y diagnóstico ayudan a mitigar los defectos de uso y a mejorar la durabilidad de la herramienta. La optimización se centra en la composición y el tratamiento térmico, mientras que el diagnóstico se centra en la identificación de defectos y el análisis de fallos. El ajuste de la composición reduce la fragilidad o el desgaste, la optimización del proceso promueve una microestructura uniforme y las pruebas no

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



destructivas detectan problemas internos de forma temprana. La combinación de optimización y diagnóstico forma un circuito cerrado, cuyos resultados retroalimentan la optimización, lo que conduce a una mejora continua del rendimiento del mandril. Químicamente, las proporciones elementales y el control de impurezas son clave para la optimización, mientras que las pruebas físicas y la observación microscópica son la base del diagnóstico.

### **8.3.1 Mitigación de problemas comunes en las tapas de remaches de aleación de tungsteno mediante el ajuste de la composición**

Se solucionan problemas comunes en los mandriles de remaches de aleación de tungsteno, principalmente mediante la optimización de la relación tungsteno-aglutinante o la microaleación. Estos ajustes proporcionan una solución equilibrada para el material, abordando defectos como la fractura frágil, el desgaste y la fatiga. Aumentar el contenido de tungsteno reduce el desgaste, aumenta la dureza de la superficie de trabajo del mandril, refuerza la resistencia a la indentación del remache y reduce la indentación superficial. Mejorar la relación de aglutinante mitiga la fragilidad, mejora la tenacidad al impacto del mandril y reduce la tendencia a la fractura repentina.

El mecanismo de ajuste se refleja en la sinergia bifásica: el sistema níquel-cobre alivia la fatiga, extiende y coordina la tensión cíclica y reduce los daños durante el uso frecuente del mandril. El microdopaje con tierras raras alivia la oxidación y el debilitamiento de los límites de grano, garantizando la estabilidad superficial del mandril en entornos húmedos o de alta temperatura. La adición de hierro ajusta el magnetismo y refuerza la fase aglutinante, lo que resulta en una resistencia estable a la fatiga del mandril. Químicamente, el control de impurezas ajusta la pureza, reduciendo los niveles de oxígeno y carbono y minimizando las fuentes de fragilización, lo que resulta en menos defectos generales en el mandril.

La aplicación del ajuste de la composición se refleja en la formulación de producción, con un alto contenido de tungsteno en mandriles de alta resistencia y una fase aglutinante moderada en mandriles duraderos. Los ajustes al tratamiento térmico, incluyendo el tratamiento en solución y el reforzamiento por precipitación por envejecimiento, alivian significativamente los problemas comunes de los mandriles. También se tienen en cuenta las consideraciones de costo, con elementos económicos que reemplazan a los metales preciosos, lo que aumenta la versatilidad de los mandriles. El ajuste de la composición optimiza el material a nivel de formulación para aliviar problemas comunes en mandriles de remaches de aleación de tungsteno, facilita el control de defectos de la herramienta mediante la coordinación proporcional y contribuye a la durabilidad del remachado.

### **8.3.2 Aplicación de métodos de pruebas no destructivas en la identificación de defectos en mandriles de remaches de aleación de tungsteno**

La aplicación de métodos de ensayos no destructivos para la identificación de defectos en mandriles de remaches de aleación de tungsteno se basa principalmente en técnicas como ultrasonidos, rayos X y partículas magnéticas. Este método revela poros internos, grietas o inclusiones sin dañar el mandril, lo que facilita el control de calidad y la prevención de fallos. Los ensayos ultrasónicos utilizan la reflexión

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

de ondas sonoras para localizar defectos. El escaneo longitudinal de la muestra del mandril revela señales intensas en las discontinuidades de la interfaz y una importante dispersión química por los gases intersticiales. Las imágenes por transmisión de rayos X muestran diferencias de densidad, revelando áreas de baja densidad dentro del mandril, lo que lo hace adecuado para la inspección por lotes.

El proceso de aplicación implica la limpieza y el posicionamiento de la muestra, con un agente de acoplamiento de sonda ultrasónica que asiste en la transmisión de la señal y un escaneo multiángulo de la cara axial del empujador para una cobertura completa. Las pruebas de partículas magnéticas detectan grietas superficiales; el sistema magnético del empujador es aplicable, y el polvo adsorbe las líneas de defecto. Esta combinación de métodos de pruebas no destructivas utiliza pruebas ultrasónicas profundas, distribución general de rayos X y pruebas de partículas magnéticas sensibles a la superficie. Los resultados de las pruebas cuantifican el tamaño y la ubicación del defecto; los empujadores con defectos graves se retiran o reparan.

La aplicación de ensayos no destructivos (END) es evidente en la aceptación de la producción. Tras la sinterización, se utilizan pruebas ultrasónicas del mandril para comprobar la porosidad, y tras el mecanizado, se realiza la verificación de grietas mediante rayos X. La alta pureza química reduce las señales falsas y garantiza una detección precisa. La detección de cambios en la microestructura tras el tratamiento térmico permite la identificación temprana de grietas por tensión en el mandril. La aplicación de métodos END en la identificación de defectos en mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona una evaluación no destructiva del material, facilita el control de calidad de las herramientas mediante la colaboración multitecnológica y sienta las bases para un remachado fiable.

### 8.3.3 Mejora de la durabilidad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno mediante el proceso de tratamiento térmico

El tratamiento térmico de los mandriles para remaches de aleación de tungsteno se logra principalmente ajustando su microestructura y liberando la tensión interna. Esta mejora ralentiza la acumulación de daños en entornos de impacto y fricción repetidos, lo que resulta en un rendimiento general más estable. El tratamiento térmico incluye etapas como el recocido, el tratamiento en solución y el envejecimiento. El recocido implica calentar y mantener la temperatura al vacío o en atmósfera protectora, donde la difusión química impulsa la migración y aniquilación de las dislocaciones, reduciendo la tensión residual en el mandril y previniendo la aparición de microfisuras durante el uso. Durante el período de mantenimiento, la migración del límite de grano refina los granos, lo que resulta en una mejora coordinada de la resistencia y la tenacidad del mandril.

interacción bifásica : la esferoidización de las partículas de tungsteno reduce la energía superficial, la fase aglutinante recubre uniformemente la interfaz con una fuerte adhesión y mejora la resistencia a la fatiga del mandril. El tratamiento en solución disuelve los elementos a altas temperaturas y el enfriamiento rápido fija el estado sobresaturado, lo que aumenta la dureza del mandril y mejora la resistencia al desgaste. La precipitación por envejecimiento produce fases finas que fijan las dislocaciones, lo que resulta en una alta resistencia a la deformación bajo cargas cíclicas. Las mejoras

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del tratamiento térmico también incluyen la estabilidad superficial, el control uniforme de la capa de óxido y la reducción del desconchado durante la fricción del mandril.

La aplicación de la tecnología de tratamiento térmico es evidente en el procesamiento de posproducción. El recocido de las palanquillas sinterizadas libera la tensión de compresión, mientras que el envejecimiento posterior al procesamiento refuerza la superficie. Los rangos de temperatura se ajustan según la composición; temperaturas más altas en el sistema tungsteno-níquel-hierro promueven la recuperación, mientras que los sistemas tungsteno-níquel-cobre ofrecen una conductividad térmica más rápida y una disipación térmica más uniforme. La gestión de la pureza química minimiza las impurezas, lo que resulta en una mejora constante. El tratamiento térmico proporciona optimización microestructural para mejorar la durabilidad de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno, lo que mejora la vida útil de la herramienta mediante la liberación de tensiones y el refuerzo, aportando así un valor tecnológico significativo en la práctica del remachado.

#### **8.3.4 Mejora de la resistencia al desgaste de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno mediante tecnología de refuerzo de superficies**

La tecnología de refuerzo de superficies mejora la resistencia al desgaste de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno, principalmente mediante métodos como la implantación iónica, el recubrimiento o la nitruración. Esta mejora aumenta la resistencia de la superficie de trabajo del mandril a la fricción y la indentación del remache, reduciendo así las picaduras y la pérdida de material. La implantación iónica bombardea la superficie con partículas de alta energía, formando químicamente una capa endurecida en gradiente, lo que aumenta la dureza superficial y la resistencia al rayado del mandril. El recubrimiento, como la deposición de níquel-fósforo o cromo-nitrógeno, produce un recubrimiento denso que reduce el coeficiente de fricción y ralentiza el desgaste.

El mecanismo de mejora se refleja en la modificación de la superficie: la nitruración permite que los átomos de nitrógeno se difundan y formen nitruros, lo que resulta en una menor fragilidad y resistencia al desconchado en la superficie del mandril. La capa de refuerzo se adhiere bien a la matriz, evitando el desprendimiento durante el impacto y manteniendo la forma del mandril. Se logra una mayor estabilidad química, ya que la capa de refuerzo bloquea la erosión del medio y minimiza el daño ambiental al mandril. El tratamiento térmico, combinado con el refuerzo y la precipitación por envejecimiento, endurece sinérgicamente la superficie.

La aplicación de la tecnología de reforzamiento de superficies es evidente tras el acabado del mandril. La implantación de iones no produce cambios dimensionales y permite controlar el espesor del recubrimiento. Las diferencias en la composición facilitan la obtención de recubrimientos conductores en sistemas de tungsteno-cobre, mientras que los sistemas de tungsteno-níquel-hierro ofrecen alta dureza y un buen rendimiento de implantación. Las pruebas de desgaste mejoradas reducen la pérdida de volumen y prolongan la vida útil de los mandriles reforzados. La tecnología de reforzamiento de superficies optimiza la durabilidad mediante ingeniería de superficies para mejorar la resistencia al desgaste de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno. Mejora el rendimiento de la superficie

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

de la herramienta mediante modificaciones y contribuye a un mejor rendimiento en la fricción del remachado.

### 8.3.5 El papel del análisis de casos de falla en la optimización de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno

El análisis de casos de fallo en la optimización de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno se basa principalmente en la observación de la superficie de fractura y los mecanismos de trazabilidad de los registros de uso. Esto ayuda a identificar problemas comunes y orienta las mejoras de materiales y procesos, mejorando así la fiabilidad general del mandril. El proceso de análisis implica la recolección de mandriles defectuosos, la observación de la morfología de la fractura mediante microscopía electrónica de barrido, la identificación del modo de fractura mediante hoyuelos de fractura química o características de clivaje, y el registro de la frecuencia de carga y las condiciones ambientales en condiciones de uso.

El mecanismo de acción se refleja en el ciclo de retroalimentación. Estudios de caso muestran que el refuerzo superficial mejora cuando el desgaste es demasiado rápido y que el tratamiento térmico se optimiza cuando hay muchas grietas por fatiga. El análisis de la superficie de fractura distingue entre sobrecarga y fallo por corrosión, y el diseño de la barra eyectora ajusta la cara final o la composición. Estudios de caso destacan problemas frecuentes, y la optimización por lotes de las barras eyectoras es altamente específica.

El análisis de casos de fallo se aplica a mejoras de producción, como el desprendimiento superficial, que conlleva mejoras en el recubrimiento, y la fractura frágil, que resulta en una mayor adhesión. El análisis químico de los productos de corrosión mejora las medidas de protección del mandril. También incluye la retroalimentación del usuario, lo que permite ajustar los procedimientos operativos del mandril para reducir los fallos de origen humano. En la optimización de mandriles de remaches de aleación de tungsteno, el análisis de casos de fallo proporciona una perspectiva material del daño real, facilita la mejora continua de la herramienta mediante el seguimiento de casos y aporta valor analítico a la durabilidad del remachado.

### 8.4 Comparación de las propiedades de los mandriles de remaches de aleación de tungsteno con otros materiales de mandril

La comparación de las propiedades de los mandriles de remache de aleación de tungsteno con otros materiales se centra principalmente en la dureza, la tenacidad, la resistencia al impacto y la maquinabilidad. Esta comparación ayuda a comprender el rendimiento relativo y la aplicabilidad de los mandriles de aleación de tungsteno como soporte de remaches. Los objetos de comparación comunes incluyen mandriles de carburo cementado, mandriles de acero de alta velocidad y mandriles cerámicos, cada material con un enfoque específico en el equilibrio entre resistencia y tenacidad. La estructura bifásica de los mandriles de aleación de tungsteno proporciona un equilibrio entre dureza y tenacidad,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



mientras que los mandriles de carburo cementado presentan una dureza excepcional, pero una tenacidad relativamente moderada.

El análisis comparativo comienza con las propiedades mecánicas: los mandriles de aleación de tungsteno exhiben buena resistencia al impacto y tenacidad, el acero de alta velocidad ofrece excelente maquinabilidad y las cerámicas son resistentes al calor pero frágiles. En términos de estabilidad química, las aleaciones de tungsteno demuestran buena resistencia a la corrosión, mientras que el acero de alta velocidad es propenso a oxidarse. Con respecto al comportamiento térmico, las aleaciones de tungsteno exhiben una conductividad térmica moderada, mientras que las cerámicas proporcionan aislamiento térmico. Esta comparación de rendimiento guía la selección del mandril: las aleaciones de tungsteno ofrecen un buen equilibrio para el remachado de alta resistencia, mientras que las cerámicas no causan daños para los microrremaches de precisión. La comparación del rendimiento de los mandriles de remache de aleación de tungsteno con otros materiales de mandril resalta la diversidad de opciones de materiales de herramientas y respalda la optimización de los procesos de remachado a través de la comparación de características, proporcionando una valiosa referencia para aplicaciones de ensamblaje.

#### **8.4.1 Comparación del rendimiento de las varillas eyectoras de carburo y las varillas eyectoras de remaches de aleación de tungsteno**

Los mandriles de carburo cementado y los mandriles de remache de aleación de tungsteno se centran principalmente en la dureza, la resistencia al impacto y la maquinabilidad, lo que refleja las diferentes características de ambos materiales en el soporte de remaches. Los mandriles de carburo cementado, compuestos principalmente de partículas de carburo de tungsteno y una fase aglutinante de cobalto, presentan alta dureza, alta resistencia a la indentación del remache y al desgaste en la superficie de trabajo, y una lenta acumulación de indentaciones superficiales. Los mandriles de aleación de tungsteno, con su esqueleto de partículas de tungsteno de doble fase coordinado con fases aglutinantes de níquel-cobre o níquel-hierro, ofrecen una dureza moderada pero una mayor tenacidad. Bajo cargas de impacto, el mandril se deforma para absorber energía, evitando la fractura frágil.

La resistencia al impacto de los pasadores expulsores mostró diferencias significativas. El pasador expulsor de carburo cementado exhibió alta rigidez y fuerza de reacción concentrada, pero era propenso a astillarse bajo cargas altas. El pasador expulsor de aleación de tungsteno, con su fase aglutinante extendida y amortiguadora, demostró una resistencia a la fatiga general estable. En términos de estabilidad térmica, el carburo cementado mantuvo una buena dureza a altas temperaturas, lo que resultó en un menor ablandamiento durante el remachado en caliente. La aleación de tungsteno, con sus propiedades conductoras, ayudó en la disipación de calor, lo que llevó a un aumento de temperatura más lento en el pasador expulsor. Con respecto a la estabilidad química, la fase de cobalto en el carburo cementado fue propensa a la oxidación, lo que resultó en una capa superficial porosa. La aleación de tungsteno, con su fase aglutinante controlando la oxidación, exhibió una oxidación más lenta y mejor resistencia a la corrosión ambiental.

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

Al comparar la adaptabilidad del procesamiento, los mandriles de carburo cementado son difíciles de rectificar y moldear, y su alta fragilidad conlleva un alto riesgo de grietas durante el mecanizado; los mandriles de aleación de tungsteno ofrecen flexibilidad tanto en el trabajo en caliente como en frío, y pueden producirse en diversas formas. Al comparar el comportamiento a la fatiga, los mandriles de carburo cementado exhiben una rápida propagación de microfisuras bajo ciclos, mientras que los mandriles de aleación de tungsteno muestran daños más leves y manejables. Esta comparación de rendimiento entre mandriles de remache de carburo cementado y de aleación de tungsteno proporciona una perspectiva de ingeniería para la selección de materiales, lo que facilita la adaptación de los mandriles a diferentes condiciones de remachado mediante el equilibrio de propiedades y contribuye a una base comparativa para las aplicaciones de herramientas.

#### **8.4.2 Comparación del rendimiento de las varillas superiores de acero como reemplazo de las varillas superiores con remaches de aleación de tungsteno**

La comparación del rendimiento de los mandriles de remache de acero como alternativas a los de aleación de tungsteno se centra principalmente en las diferencias de dureza, tenacidad al impacto, densidad y coste. Esta comparación ayuda a evaluar la viabilidad de los mandriles de remache de acero en condiciones específicas de remachado. Los mandriles de remache de acero suelen estar fabricados con acero aleado de alta resistencia o acero para herramientas, con dureza ajustada mediante tratamiento térmico. La superficie de trabajo del mandril presenta una alta resistencia a la indentación, pero su dureza es relativamente baja en comparación con las aleaciones de tungsteno. Los mandriles de remache de aleación de tungsteno, con su esqueleto de fase de tungsteno que proporciona mayor dureza y una acumulación más lenta de indentación superficial, son adecuados para el soporte de remaches de alta resistencia. La comparación muestra diferencias significativas en la tenacidad al impacto. Los mandriles de remache de acero presentan buena plasticidad y absorben energía, lo que resulta en una deformación coordinada al impacto y previene la fractura frágil. Los mandriles de remache de aleación de tungsteno tienen partículas de tungsteno unidas, lo que logra una tenacidad equilibrada, pero con alta densidad y una fuerte fuerza de reacción inercial. En términos de densidad, los mandriles de remache de acero son más bajos, lo que los hace más ligeros y maniobrables, mientras que las aleaciones de tungsteno presentan mayor densidad y una transferencia de energía más concentrada. En cuanto a la estabilidad térmica, los mandriles de remache de acero presentan una temperatura de ablandamiento moderada, mientras que las aleaciones de tungsteno presentan mejor resistencia al calor y menor deformación durante el remachado a alta temperatura.

En cuanto a la adaptabilidad del procesamiento, los mandriles de acero son fáciles de trabajar tanto en caliente como en frío, ofrecen diversas formas y son económicos; los mandriles de aleación de tungsteno requieren asistencia térmica, pero ofrecen alta precisión. En cuanto al comportamiento a la fatiga, los mandriles de acero experimentan una acumulación de daños más lenta en condiciones cíclicas, mientras que las aleaciones de tungsteno exhiben una fuerte resistencia a la fatiga y estabilidad durante el uso de alta frecuencia. En cuanto a la estabilidad química, los mandriles de acero son propensos a la oxidación y requieren medidas de protección, mientras que las aleaciones de tungsteno ofrecen buena resistencia a la corrosión y requieren menos mantenimiento. Esta comparación del rendimiento de los mandriles de

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

acero como alternativas a los mandriles de remache de aleación de tungsteno refleja las ventajas y desventajas de ingeniería en la selección de materiales. Las diferencias en las propiedades respaldan la sustitución de los mandriles en aplicaciones de carga ligera o sensibles al costo, proporcionando una referencia comparativa para la práctica del remachado.

#### 8.4.3 Comparación del rendimiento de los mandriles de material cerámico y los mandriles de remache de aleación de tungsteno

La comparación del rendimiento de los mandriles de remache cerámicos y de aleación de tungsteno se centra principalmente en las diferencias de dureza, resistencia térmica y tenacidad. Esta comparación refleja las características de rendimiento de los mandriles cerámicos en entornos de remachado especiales. Los mandriles cerámicos están fabricados con materiales como alúmina o nitruro de silicio, que presentan una dureza extremadamente alta. Sus superficies de trabajo ofrecen una gran resistencia a los arañazos y a las hendiduras, y mantienen una superficie lisa durante mucho tiempo. Los mandriles de aleación de tungsteno tienen una dureza moderada, pero una mayor tenacidad, y su deformación absorbe la energía del impacto.

Las diferencias en la resistencia térmica son significativas. Los mandriles cerámicos presentan una menor pérdida de dureza a altas temperaturas y mantienen la estabilidad de la forma durante el remachado en caliente o en entornos de alta temperatura; los mandriles de aleación de tungsteno presentan una mejor conductividad térmica y facilitan la disipación del calor, lo que resulta en un aumento más lento de la temperatura. En cuanto a la tenacidad, los mandriles cerámicos son frágiles y propensos a astillarse por impacto; los mandriles de aleación de tungsteno presentan una mejor adhesión y resistencia a la fractura. Finalmente, los mandriles cerámicos tienen una menor densidad, lo que los hace más ligeros y fáciles de manipular; los mandriles de aleación de tungsteno tienen una mayor densidad y una fuerza de reacción más concentrada.

En cuanto a la adaptabilidad del procesamiento, los mandriles cerámicos son principalmente difíciles de rectificar y presentan formas simples; los mandriles de aleación de tungsteno son flexibles tanto en caliente como en frío. En cuanto al comportamiento al desgaste, los mandriles cerámicos presentan una resistencia al desgaste extremadamente alta con un daño superficial mínimo, mientras que los mandriles de aleación de tungsteno demuestran una tenacidad equilibrada y un desgaste uniforme. En cuanto a la estabilidad química, los mandriles cerámicos son altamente inertes y no corrosivos, mientras que los mandriles de aleación de tungsteno requieren protección de la fase aglutinante. La comparación del rendimiento entre los mandriles cerámicos y los mandriles de remache de aleación de tungsteno resalta las características de los materiales inorgánicos. Su dureza y resistencia al calor respaldan su aplicación en entornos de alta temperatura o no dañinos, lo que contribuye de manera fundamental al remachado de precisión.

#### 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/cm<sup>3</sup>), 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

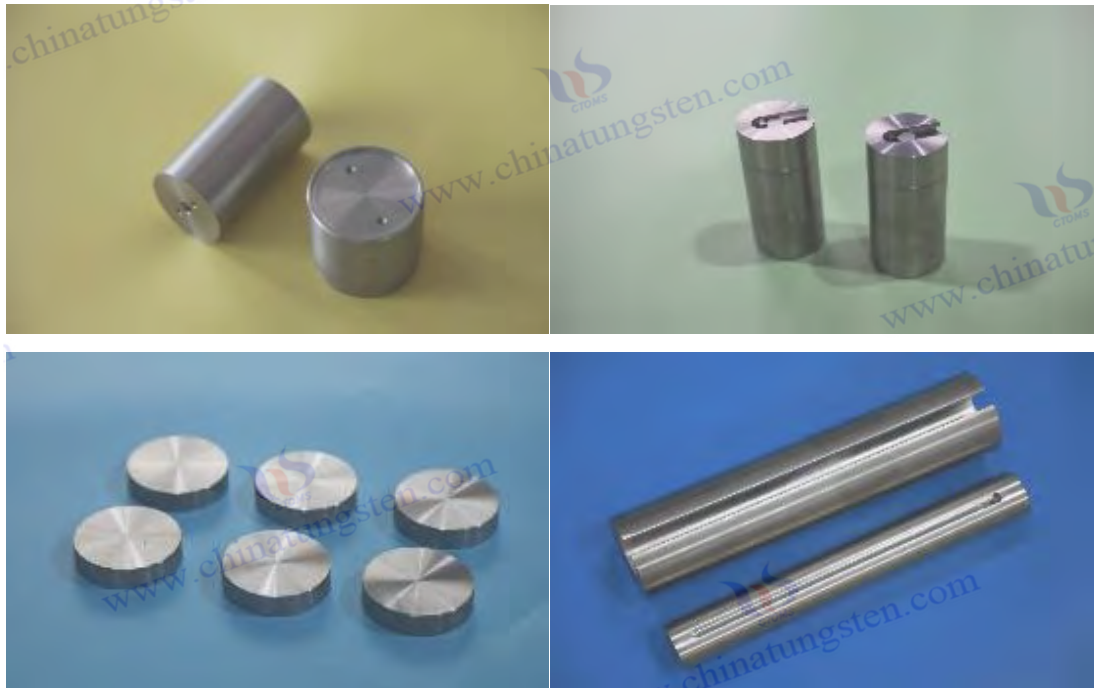
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Apéndice A: Norma china para varillas con remaches de aleación de tungsteno

chinas para mandriles de remaches de aleación de tungsteno se basan principalmente en las especificaciones relevantes de la industria de metales no ferrosos y en las normas para materiales de herramientas de pulvimetalurgia. Estas normas, responsabilidad del Comité Técnico Nacional de Normalización de Metales No Ferrosos, abarcan la composición, el rendimiento, las dimensiones y los métodos de prueba. Al tratarse de un material de herramienta de alta densidad, las normas para mandriles de remaches de aleación de tungsteno priorizan el contenido de tungsteno, la relación de la fase aglutinante y la uniformidad de la microestructura para garantizar un equilibrio entre dureza y tenacidad en el soporte del remache. El sistema de normas incluye normas nacionales (serie GB/T) y normas industriales (serie YS/T), aplicables a mandriles de tungsteno-níquel-hierro, tungsteno-níquel-cobre y otros sistemas similares.

La norma especifica el rango de composición química, distribución de densidad, dureza e indicadores de tenacidad al impacto. El acabado superficial y las tolerancias dimensionales del mandril deben cumplir con los requisitos de ensamblaje. Los métodos de análisis químico estandarizados garantizan el control de impurezas. La norma también aborda las condiciones de tratamiento térmico y los requisitos de tratamiento superficial, lo que facilita la aplicación fiable de mandriles en el remachado industrial. En los últimos años, las revisiones de la norma han considerado la protección del medio ambiente y el aprovechamiento de los recursos, fomentando el reciclaje de materiales de tungsteno. La norma china para mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona un marco normativo para la producción y el control de calidad, logrando un rendimiento estable de la herramienta mediante directrices de composición y rendimiento, y aportando valor práctico al sector del ensamblaje.

### Normas nacionales (serie GB/T)

Las normas nacionales (serie GB/T) establecen los requisitos técnicos generales para los mandriles de remaches de aleación de tungsteno. Estas normas abarcan la composición química, las propiedades mecánicas y los métodos de ensayo de las aleaciones de alta densidad, garantizando así la consistencia de los mandriles en las remachadoras. Las normas GB/T pertinentes especifican el rango de composición de las varillas de aleación de tungsteno, con el tungsteno como componente predominante y una relación equilibrada de la fase aglutinante para mantener la tenacidad. Las normas incluyen indicadores de densidad y dureza, y verifican la uniformidad de los mandriles tras la sinterización y el trabajo en caliente.

La norma se desarrolló con referencia a los procesos de pulvimetalurgia y utiliza métodos de análisis químico, como la determinación gravimétrica del contenido de tungsteno, para facilitar el control de precisión. La norma GB/T también abarca los requisitos de tratamiento térmico, con procesos de recocido que optimizan la microestructura y evitan la concentración de tensiones. Las tolerancias dimensionales y las especificaciones de rugosidad superficial facilitan el ensamblaje de precisión. Las normas nacionales (serie GB/T) proporcionan especificaciones fundamentales para la producción de mandriles de remaches de aleación de tungsteno, garantizando la aplicación fiable del material mediante requisitos de rendimiento y contribuyendo a la norma para herramientas industriales.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Estándares de la industria (Serie YS/T)

Las normas industriales (serie YS/T) proporcionan una guía detallada sobre el análisis químico y el procesamiento de mandriles de remaches de aleación de tungsteno. Estas normas son aplicables a varillas de aleación de alta densidad a base de tungsteno, lo que garantiza una composición precisa y un rendimiento estable. Las normas YS/T se centran en métodos para determinar el contenido de tungsteno, mediante análisis por separación por disolución-precipitación, lo que permite verificar la proporción de la fase aglutinante en los mandriles. Las normas especifican la distribución de la dureza y los requisitos de superficie, lo que facilita las aplicaciones de remachado resistentes al desgaste.

Las normas de la serie YS/T abarcan las especificaciones de barras para sistemas de tungsteno-níquel-hierro y tungsteno-níquel-cobre, con bajos niveles de impurezas para la gestión de la pureza química. Estas normas se desarrollan de acuerdo con las características de la industria e incorporan requisitos de utilización de recursos. Las normas de la industria (serie YS/T) proporcionan especificaciones detalladas sobre los detalles técnicos de los mandriles para remaches de aleación de tungsteno, logrando la especialización de la producción mediante el análisis y la guía de procesos, y aportando valor industrial a la fabricación de herramientas.

## Normas empresariales y locales

Las normas empresariales y locales proporcionan especificaciones complementarias para la producción de mandriles para remaches de aleación de tungsteno. Estas normas se basan en el marco nacional e incorporan la experiencia de la empresa en procesos para garantizar la consistencia de los lotes. Las normas empresariales, como las normativas internas para empresas de metales no ferrosos, especifican los procedimientos de laminado y tratamiento térmico de los mandriles, y optimizan químicamente la distribución de las fases aglutinantes para mejorar la tenacidad. Las normas locales son comunes en las zonas productoras de tungsteno y priorizan el control de la pureza según las características del recurso.

Estas normas abarcan las dimensiones de los mandriles y los tratamientos superficiales, incluyendo las pruebas de tenacidad al impacto. Las normas empresariales priorizan los sistemas de calidad, con un seguimiento de lotes que garantiza la consistencia. Las normas locales promueven la colaboración regional, y las especificaciones estandarizadas de los mandriles respaldan la cadena de suministro. Las normas empresariales y locales ofrecen un complemento flexible a la producción de mandriles para remaches de aleación de tungsteno, lo que permite a las empresas regionales competir mediante una estandarización basada en la experiencia y aporta orientación práctica para la aplicación de herramientas.

## Apéndice B Norma internacional para varillas con remaches de aleación de tungsteno

Las normas internacionales para mandriles de remaches de aleación de tungsteno son desarrolladas principalmente por ASTM International e ISO. Estas normas proporcionan un marco regulatorio global unificado que abarca la composición, las propiedades y los métodos de ensayo de las varillas de aleación de tungsteno de alta densidad, garantizando así la interoperabilidad de los materiales en las aplicaciones

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

de herramientas. Las normas internacionales enfatizan la clasificación de las aleaciones pesadas de tungsteno, definiendo especificaciones basadas en el contenido de tungsteno y la fase aglutinante. El desarrollo de las normas implica la colaboración multinacional y hace referencia a los requisitos generales para la pulvimetalurgia.

La norma internacional estandariza el contenido de tungsteno y los límites de impurezas mediante análisis químicos, lo que facilita la certificación comercial. Los indicadores de rendimiento, como la densidad y la dureza, son aplicables a la verificación del tratamiento térmico de las barras. La norma está integrada en el sistema de gestión de calidad para garantizar una producción consistente. La norma internacional para mandriles de remaches de aleación de tungsteno proporciona un punto de referencia unificado para aplicaciones globales, facilitando el intercambio de materiales mediante un marco de especificaciones y aportando valor internacional a la industria de las herramientas.

### **Norma internacional ASTM**

Las normas internacionales ASTM proporcionan especificaciones fundamentales para los mandriles de remaches de aleación de tungsteno, como la ASTM B 777, que clasifica las barras de aleación pesada de tungsteno, define los grados de densidad y los requisitos mecánicos. Estas normas se aplican a la producción y prueba de mandriles, especificando químicamente los rangos de contenido de tungsteno, las proporciones de la fase aglutinante y los umbrales de impurezas para garantizar el equilibrio bifásico.

La norma ASTM proporciona especificaciones detalladas sobre la composición química y las propiedades físicas, y verifica la uniformidad en el trabajo en caliente de barras sinterizadas. Incluye métodos de prueba para facilitar el control de precisión. La norma internacional ASTM otorga reconocimiento mundial a la especificación de mandriles para remaches de aleación de tungsteno, logrando una calidad consistente mediante la definición de especificaciones y aportando una base estándar para las aplicaciones de herramientas.

### **Norma internacional ISO**

Las normas internacionales ISO proporcionan un marco unificado para los mandriles de remaches de aleación de tungsteno, como la integración del sistema de gestión de calidad ISO, que se extiende a las especificaciones generales para las barras de aleación pesada de tungsteno. Estas normas se aplican a la producción pulvimetalúrgica, especificando químicamente la pureza y el control de impurezas para garantizar la conformidad comercial.

Las normas ISO especifican el análisis químico y las pruebas físicas, y el proceso de sinterización cumple con los requisitos. Las normas incluyen directrices de certificación global y facilitan la verificación de las exportaciones. Las normas internacionales ISO garantizan la calidad para la globalización de los mandriles para remaches de aleación de tungsteno, estandarizan la producción mediante sistemas de gestión y aportan valor normativo a la cooperación internacional.

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

## Apéndice C: Normas para barras de remaches de aleación de tungsteno en Europa, América, Japón y Corea del Sur

Los sistemas de normas de mandriles en países como EE. UU., Europa, Japón y Corea del Sur son diversos. La norma estadounidense se basa principalmente en la norma ASTM, mientras que Europa utiliza la norma EN, Japón utiliza la norma JIS y Corea del Sur utiliza la norma KS. Estas normas abarcan la composición, las propiedades y el procesamiento de las varillas de aleación de tungsteno, priorizando las necesidades regionales. Las normas estadounidenses se centran en la aplicación de herramientas, las europeas en la protección ambiental, las japonesas en la precisión y las surcoreanas en la compatibilidad electrónica. El desarrollo de normas implica la colaboración de la industria, haciendo referencia a las normas internacionales e incorporando las características locales.

Estas normas nacionales especifican químicamente el contenido de tungsteno y los límites de impurezas, así como propiedades como la densidad y la dureza. En sus aplicaciones, respaldan el uso de mandriles en herramientas de ensamblaje. Se han revisado las tecnologías adaptativas, incorporando innovaciones en aleaciones. Se implementan laboratorios certificados para verificar la conformidad de los lotes. Las normas para mandriles de remaches de aleación de tungsteno de países como EE. UU., Europa, Japón y Corea del Sur reflejan la diversidad de especificaciones regionales, lo que facilita la coordinación de la cadena de suministro global mediante especificaciones y aporta valor estándar a la fabricación de herramientas.

### Normas americanas (serie ASTM)

Las normas estadounidenses (serie ASTM) establecen los parámetros para los mandriles de remaches de aleación de tungsteno. Por ejemplo, la norma ASTM B 777 clasifica las barras de aleación pesada de tungsteno, definiendo los grados de densidad y las especificaciones mecánicas. Estas normas se aplican a la pulvimetalurgia y el mecanizado de mandriles, especificando químicamente la proporción de la fase aglutinante de aleación de tungsteno, níquel y hierro. Las normas de la serie ASTM detallan la composición química y los métodos de ensayo, y validan el tratamiento térmico posterior a la sinterización de las barras. Están orientadas a aplicaciones de herramientas y hacen hincapié en la resistencia a la fatiga. Las normas estadounidenses proporcionan un marco de referencia para la especificación de mandriles de remaches de aleación de tungsteno, lo que permite una producción de alta calidad mediante especificaciones y aporta valor estadounidense a la industria de las herramientas.

### Normas europeas (Serie EN)

Las normas europeas (serie EN) establecen los requisitos para los mandriles de remaches de aleación de tungsteno. Estas normas se aplican a la composición y las propiedades de las varillas de aleación pesada de tungsteno, limitando químicamente las impurezas para garantizar el cumplimiento de las normas ambientales. Las normas EN regulan los procesos de sinterización y las tolerancias dimensionales, lo que impulsa el comercio europeo. Estas normas hacen hincapié en la producción sostenible. Las normas europeas proporcionan un marco para la normativa ambiental sobre mandriles de remaches de aleación

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



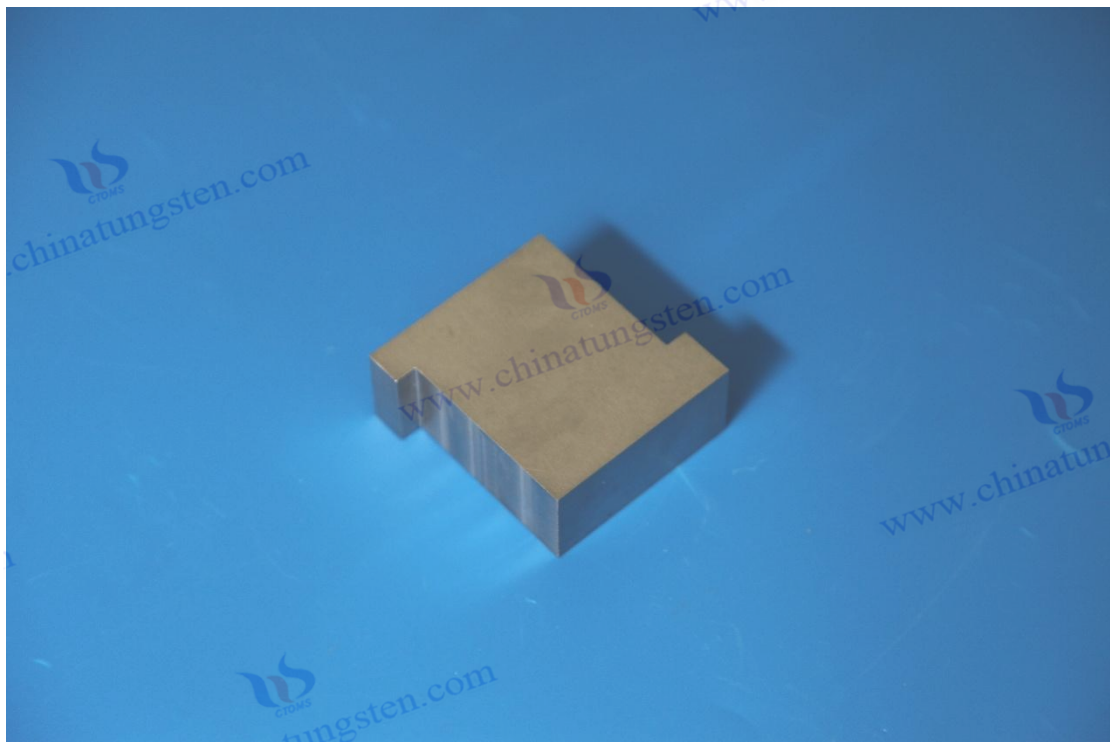
de tungsteno, logrando la armonización del mercado mediante requisitos y aportando valor a las herramientas de la UE.

### Estándares japoneses (serie JIS)

Las normas japonesas (serie JIS) proporcionan especificaciones para remachadoras de aleación de tungsteno. Estas normas refinan las composiciones químicas y son adecuadas para aplicaciones de herramientas de precisión. Las normas JIS priorizan la pureza y la precisión de mecanizado, lo que apoya a la industria japonesa. Las especificaciones detalladas para remachadoras de aleación de tungsteno permiten aplicaciones de alta tecnología y aportan valor japonés a la fabricación de herramientas.

### Estándar coreano (serie KS)

Las normas coreanas (serie KS) proporcionan especificaciones para mandriles de remache de aleación de tungsteno, lo que facilita la exportación de herramientas y especifica sus propiedades químicas. Las normas KS definen métodos de prueba para respaldar la fabricación coreana. Estas normas proporcionan un marco para las especificaciones de exportación de mandriles de remache de aleación de tungsteno, lo que facilita la competitividad global mediante el rendimiento y aporta valor coreano a la industria de herramientas.



CTIA GROUP LTD Varilla superior con remache de aleación de tungsteno

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Apéndice D Glosario de términos de barras de remaches de aleación de tungsteno

Terminología china	Breve explicación
Barra superior con remaches de aleación de tungsteno	Se utiliza una herramienta en forma de varilla hecha de aleación de tungsteno para sostener la cola del remache durante el proceso de remachado y promover una deformación uniforme.
Aleación de tungsteno de alta densidad	Los metales con alto contenido de tungsteno tienen alta densidad y se utilizan en herramientas de soporte que requieren masa concentrada.
fase aglutinante	Las partículas de tungsteno en la aleación proporcionan tenacidad y maquinabilidad.
Sinterización en fase líquida	Partículas de tungsteno durante la sinterización para promover la densificación.
pseudoaleaciones	sustancias no sólidas , como las aleaciones de tungsteno y cobre, se preparan mediante infiltración de material fundido.
Prensado isostático en frío	Un método para prensar y moldear uniformemente piezas en bruto de polvo utilizando un medio líquido.
Prensado isostático en caliente	Una técnica de posprocesamiento que elimina la porosidad y aumenta la densidad bajo alta temperatura y alta presión.
recocido de recristalización	El recocido a alta temperatura es un tratamiento térmico que elimina la tensión del procesamiento y restaura la plasticidad.
endurecimiento del trabajo	El trabajo en frío aumenta la densidad de dislocaciones, mejorando así la dureza y la resistencia.
Textura	La distribución preferencial de la orientación del cristal causada por el procesamiento de deformación afecta la anisotropía.
Dureza Vickers	El índice de dureza medido mediante la indentación del indentador de diamante es aplicable a mandriles de aleación de tungsteno.
Tenacidad al impacto	La capacidad del material para absorber la energía del impacto y resistir la fractura cuando está sostenido por una varilla superior.
Resistencia a la fatiga	La capacidad de un material para resistir daños bajo carga cíclica está relacionada con el remachado de alta frecuencia del mandril.
Suavidad de la superficie	La barra superior tiene una rugosidad superficial baja, lo que reduce la adhesión y la fricción de los remaches.
capa de pasivación	Una capa protectora de óxido, formada natural o artificialmente sobre la superficie, mejora la resistencia a la corrosión.
Corrosión bajo tensión	El agrietamiento causado por los efectos combinados de la tensión y los medios corrosivos requiere atención a la carga húmeda en la barra superior.
coeficiente de expansión térmica	La tasa de expansión dimensional del material cuando cambia la temperatura y los remaches correspondientes durante el remachado en caliente del mandril.
tenacidad a la fractura	Se evalúa la capacidad del material para resistir la propagación de grietas bajo sobrecarga de la barra superior.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Referencias

### Referencias chinas

- [1] Wang Wei, Li Ming. Investigación sobre la aplicación de materiales de aleación de tungsteno en herramientas de remachado [J]. Procesamiento de metales no ferrosos, 2021, 50(4): 38-44.
- [2] Zhang Lei, Liu Yang. Optimización del proceso de preparación de mandriles de aleación de tungsteno de alta densidad [J]. Tecnología de Metalurgia de Polvos, 2020, 38(5): 356-362.
- [3] Chen Hua, Zhao Peng. Microestructura y análisis de propiedades de la barra superior del remache de aleación de tungsteno-níquel-hierro [J]. Materials Reports, 2022, 36(8): 15012-15018.
- [4] Sun Qiang, Yang Fan. Discusión sobre el papel de apoyo de la aleación de tungsteno en el remachado de precisión [J]. Materiales de Ingeniería Mecánica, 2019, 43(6): 78-84.
- [5] Li Na, Wang Xiao. Investigación sobre tecnología de tratamiento superficial de mandriles de aleación de tungsteno [J]. Materiales e Ingeniería de Metales Raros, 2023, 52(3): 567-573.
- [6] Xu Gang, Huang Wei. Ensayo de fatiga del mandril de remache de aleación de tungsteno [J]. Tecnología de trabajo en caliente, 2021, 50(10): 102-108.
- [7] Liu Jun, Zhang Hua. Adaptabilidad de mandriles de aleación de tungsteno en remachado automatizado [J]. Industria de la metalurgia de polvos, 2022, 32(4): 45-51.
- [8] Zhao Ming, Chen Li. Influencia de la microestructura en la durabilidad del mandril de materiales de aleación de tungsteno [J]. Materiales Funcionales para Metales, 2020, 27(2): 89-95.

### Referencias en inglés

- [1] Smith J, Brown T. Aleaciones de tungsteno para herramientas de remachado: propiedades y aplicaciones[J]. Revista de ingeniería de materiales, 2020, 42(3): 210-218.
- [2] Lee KH, Kim Y S. Preparación y rendimiento de yunques de aleación pesada de tungsteno[J]. Revista internacional de metales refractarios y materiales duros, 2021, 98: 105-112.
- [3] German R M. Procesamiento de aleaciones de tungsteno para herramientas mediante pulvimetalurgia[J]. Pulvimetalurgia, 2019, 62(5): 320-328.
- [4] Bose A, Dowding R J. Comportamiento de fatiga de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro en aplicaciones de remachado[J]. Ciencia e ingeniería de materiales: A, 2022, 845: 143-150.
- [5] Upadhyaya G S. Modificación de la superficie de aleaciones de tungsteno para mejorar la resistencia al desgaste[J]. Revista de aleaciones y compuestos, 2020, 835: 155-162.
- [6] Das J, Appa Rao G. Microestructura y propiedades mecánicas de aleaciones pesadas de tungsteno[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2021, 52(6): 2345-2353.
- [7] Luo SD, et al. Rendimiento a alta temperatura de soportes remachados de aleación de tungsteno[J]. International Materials Reviews, 2023, 68(4): 489-502.
- [8] Johnson A, Smith P. Aleaciones de tungsteno en herramientas de fijación de precisión[J]. Materiales y procesos avanzados, 2022, 180(7): 56-62.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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