

## Qué son las láminas 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 uno: Comprensión básica de las láminas de aleación de tungsteno

- 1.1 Concepto de láminas de aleación de tungsteno
  - 1.1.1 Definición de láminas de aleación de tungsteno
  - 1.1.2 Diferenciación con materiales relacionados
- 1.2 Importancia del desarrollo y la investigación de las láminas de aleación de tungsteno
  - 1.2.1 Contexto de desarrollo basado en la utilización de recursos de tungsteno
  - 1.2.2 Valor del estudio de láminas de aleación de tungsteno desde una perspectiva de ingeniería química
  - 1.2.3 Estado de las láminas de aleación de tungsteno en los campos de aplicación

### Capítulo dos Sistema de clasificación de láminas de aleación de tungsteno

- 2.1 Clasificación de las láminas de aleación de tungsteno según la composición del material
  - 2.1.1 Láminas de aleación de tungsteno de la serie níquel-hierro
  - 2.1.2 Láminas de aleación de tungsteno de la serie níquel-cobre
  - 2.1.3 Láminas de aleación de tungsteno y cobre
  - 2.1.4 Láminas de aleación de tungsteno y plata
  - 2.1.5 Otras láminas de aleación de tungsteno en fase aglutinante
- 2.2 Clasificación de láminas de aleación de tungsteno según las propiedades del núcleo
  - 2.2.1 Láminas de aleación de tungsteno de alta densidad
  - 2.2.2 Láminas de aleación de tungsteno de alta dureza
  - 2.2.3 Láminas de aleación de tungsteno resistentes a la corrosión y al desgaste
- 2.3 Clasificación de láminas de aleación de tungsteno según especificaciones de tamaño
  - 2.3.1 Láminas de aleación de tungsteno ultrafinas (espesor  $< 0,1$  mm)
  - 2.3.2 Láminas de aleación de tungsteno de espesor convencional (0,1-10 mm)
  - 2.3.3 Láminas de aleación de tungsteno de paredes gruesas (espesor  $> 10$  mm)
  - 2.3.4 Láminas de aleación de tungsteno de tamaño especial (personalizadas)
- 2.4 Clasificación de láminas de aleación de tungsteno según escenarios de aplicación
  - 2.4.1 Láminas de aleación de tungsteno para la defensa nacional y la industria militar
  - 2.4.2 Láminas de aleación de tungsteno para fabricación industrial
  - 2.4.3 Láminas de aleación de tungsteno para aplicaciones nucleares y médicas
  - 2.4.4 Láminas de aleación de tungsteno para información electrónica
  - 2.4.5 Otras láminas de aleación de tungsteno especializadas

### Capítulo tres: Principios de aleación y sistemas de composición de láminas de aleación de tungsteno

- 3.1 Principios químicos de la aleación en láminas de aleación de tungsteno
  - 3.1.1 Análisis del diagrama de fases del tungsteno con otros elementos metálicos
  - 3.1.2 Mecanismos químicos de fortalecimiento por solución sólida y fortalecimiento por dispersión
  - 3.1.3 Condiciones de formación y estabilidad de las fases de aleación
- 3.2 Funciones y proporciones de los elementos constituyentes en láminas de aleación de tungsteno
  - 3.2.1 Mecanismo sinérgico del sistema níquel-hierro en láminas de aleación de tungsteno
  - 3.2.2 Mecanismo sinérgico del sistema níquel-cobre en láminas de aleación de tungsteno

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.2.3 Efectos del dopaje de los oligoelementos en láminas de aleación de tungsteno
- 3.3 Reglas químicas para el diseño de la composición de láminas de aleación de tungsteno
  - 3.3.1 Lógica de optimización de la composición orientada al rendimiento para láminas de aleación de tungsteno
  - 3.3.2 Métodos de control químico para la uniformidad de la composición en láminas de aleación de tungsteno
  - 3.3.3 Efectos de los elementos de impureza en las propiedades de las láminas de aleación de tungsteno
  - 3.3.4 Métodos para eliminar impurezas en láminas de aleación de tungsteno

## **Capítulo cuatro Relaciones entre la estructura y las propiedades de las láminas de aleación de tungsteno**

- 4.1 Microestructura de láminas de aleación de tungsteno
  - 4.1.1 Estructura del grano y composición química del límite del grano
  - 4.1.2 Distribución y estado químico de las fases de aleación
  - 4.1.3 Causas químicas de estructuras defectuosas
- 4.2 Propiedades y mecanismos de las láminas de aleación de tungsteno
  - 4.2.1 Principio de empaquetamiento atómico químico de alta densidad en láminas de aleación de tungsteno
  - 4.2.2 Mecanismo de transporte químico de la conductividad térmica y eléctrica en láminas de aleación de tungsteno
  - 4.2.3 Soporte estructural químico para la estabilidad térmica de láminas de aleación de tungsteno
- 4.3 Correlación entre las propiedades mecánicas y químicas de las láminas de aleación de tungsteno
  - 4.3.1 Relación entre la dureza de las láminas de aleación de tungsteno y la resistencia del enlace químico
  - 4.3.2 Mecanismo de resistencia a la corrosión química y resistencia al desgaste en láminas de aleación de tungsteno
  - 4.3.3 Función de la barrera química superficial en la resistencia a la corrosión de las láminas de aleación de tungsteno
- 4.4 Análisis de las correlaciones proceso-estructura-propiedad en láminas de aleación de tungsteno
  - 4.4.1 Función reguladora del proceso de sinterización en la microestructura de las láminas de aleación de tungsteno
  - 4.4.2 Mecanismo de influencia del proceso de laminación en las propiedades mecánicas de las láminas de aleación de tungsteno
  - 4.4.3 Ruta de optimización del tratamiento superficial para las propiedades químicas de láminas de aleación de tungsteno
- 4.5 Estructura y respuestas de propiedades de láminas de aleación de tungsteno en entornos especiales
  - 4.5.1 Cambios en la estabilidad estructural de láminas de aleación de tungsteno en entornos de alta temperatura
  - 4.5.2 Tolerancia estructural química de láminas de aleación de tungsteno en entornos de radiación
  - 4.5.3 Leyes de evolución de propiedades de láminas de aleación de tungsteno bajo presión extrema
- 4.6 Hojas de datos de seguridad de materiales (MSDS) para láminas de aleación de tungsteno de CTIA GROUP LTD

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

## Capítulo cinco: Métodos de prueba y caracterización del rendimiento de láminas de aleación de tungsteno

- 5.1 Técnicas de análisis de la composición química de láminas de aleación de tungsteno
  - 5.1.1 Análisis de láminas de aleación de tungsteno mediante espectroscopia de absorción atómica y espectroscopia de emisión
  - 5.1.2 Método cuantitativo de espectroscopia de fluorescencia de rayos X para la composición de láminas de aleación de tungsteno
  - 5.1.3 Análisis de titulación química de oligoelementos en láminas de aleación de tungsteno
- 5.2 Métodos de caracterización de la microestructura para láminas de aleación de tungsteno
  - 5.2.1 Microscopía electrónica de barrido: morfología y mapeo de la composición de láminas de aleación de tungsteno
  - 5.2.2 Análisis de la fase y la estructura cristalina por difracción de rayos X de láminas de aleación de tungsteno
  - 5.2.3 Observación mediante microscopía electrónica de transmisión de defectos microscópicos en láminas de aleación de tungsteno
- 5.3 Normas de prueba de indicadores de rendimiento para láminas de aleación de tungsteno
  - 5.3.1 Métodos de prueba para la densidad y compacidad de láminas de aleación de tungsteno
  - 5.3.2 Métodos de prueba para la dureza de láminas de aleación de tungsteno
  - 5.3.3 Métodos de prueba para la resistencia a la corrosión de láminas de aleación de tungsteno
  - 5.3.4 Métodos de prueba para la resistencia al desgaste de láminas de aleación de tungsteno
  - 5.3.5 Métodos de prueba para la resistencia de láminas de aleación de tungsteno

## Capítulo seis Procesos de preparación de láminas de aleación de tungsteno

- 6.1 Procesos de preparación y clasificación de láminas de aleación de tungsteno
  - 6.1.1 Principales rutas de preparación de láminas de aleación de tungsteno
  - 6.1.2 Diferencias de proceso entre láminas de aleación de tungsteno de alta densidad y láminas de baja densidad
  - 6.1.3 Rangos de espesor típicos y selección del proceso correspondiente (0,05 mm ~ 50 mm)
- 6.2 Preparación de materia prima en polvo
  - 6.2.1 Preparación y requisitos de calidad del polvo de tungsteno de alta pureza
  - 6.2.2 Selección y pretratamiento de polvos de elementos de aleación (Ni, Fe, Cu, Co, Mo, etc.)
  - 6.2.3 Control de la distribución del tamaño de partículas de polvo y prueba del tamaño de partículas de Fisher
  - 6.2.4 Métodos de mezcla y aleación de polvos
- 6.3 Procesos de formación de polvo
  - 6.3.1 Prensado isostático en frío
  - 6.3.2 Optimización de parámetros de presión y prensado de matriz
  - 6.3.3 Aplicación del moldeo por inyección en piezas de chapa fina
  - 6.3.4 Procesos de mejora de la resistencia en verde y desengrasado
- 6.4 Procesos de sinterización
  - 6.4.1 Tecnología de sinterización vertical en atmósfera de hidrógeno
  - 6.4.2 Ventana de temperatura de sinterización en fase líquida y control del tiempo de retención

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.4.3 Sinterización al vacío y proceso integrado de sinterización-prensado isostático en caliente
- 6.4.4 Control de deformación de sinterización y diseño de herramientas de soporte
- 6.4.5 Garantía de uniformidad del campo de temperatura para la sinterización de placas en bruto de gran tamaño
- 6.5 Trabajo en caliente y tratamiento térmico
  - 6.5.1 Procesos de forja desbastada y laminación en caliente
  - 6.5.2 Forjado multidireccional para mejorar la uniformidad del tejido
  - 6.5.3 Tratamiento térmico de recocido intermedio y alivio de tensiones
  - 6.5.4 Tratamiento de solución a alta temperatura y enfriamiento rápido
- 6.6 Laminación en frío y laminación en caliente para la preparación de láminas delgadas
  - 6.6.1 Distribución de la deformación total en el programa de laminación en frío y reducción de pasadas
  - 6.6.2 Aplicación del laminado en caliente en aleaciones con alto contenido de tungsteno
  - 6.6.3 Control de la dirección de laminación y optimización de la textura
  - 6.6.4 Procesos de prevención y recorte de grietas en los bordes
- 6.7 Tratamiento y acabado de superficies
  - 6.7.1 Limpieza química y decapado para eliminar capas de óxido
  - 6.7.2 Limpieza alcalina para eliminar el enriquecimiento de la superficie de la fase aglutinante
  - 6.7.3 Rectificado y pulido mecánico
  - 6.7.4 Proceso de nivelación en caliente con protección de vacío/hidrógeno
  - 6.7.5 Corte de precisión, corte por láser y corte por chorro de agua

## Capítulo Siete Aplicaciones de las láminas de aleación de tungsteno

- 7.1 Aplicaciones de las láminas de aleación de tungsteno en los campos de defensa nacional y militar
  - 7.1.1 Láminas de aleación de tungsteno para perforación de blindaje
  - 7.1.2 Láminas de aleación de tungsteno para contrapesos
  - 7.1.3 Láminas de aleación de tungsteno para protección
- 7.2 Aplicaciones de las láminas de aleación de tungsteno en campos de fabricación de alta gama
  - 7.2.1 Láminas de aleación de tungsteno para insertos de molde
  - 7.2.2 Láminas de aleación de tungsteno para herramientas de corte
  - 7.2.3 Láminas de aleación de tungsteno para contrapesos mecánicos
- 7.3 Aplicaciones de las láminas de aleación de tungsteno en los campos nuclear y médico
  - 7.3.1 Láminas de aleación de tungsteno para blindaje nuclear
  - 7.3.2 Láminas de aleación de tungsteno para blindaje médico
  - 7.3.3 Láminas de aleación de tungsteno para entornos nucleares
- 7.4 Aplicaciones de las láminas de aleación de tungsteno en los campos de la electrónica y las nuevas energías
  - 7.4.1 Láminas de aleación de tungsteno para sustratos de disipación de calor
  - 7.4.2 Láminas de aleación de tungsteno para embalaje electrónico
  - 7.4.3 Láminas de aleación de tungsteno para electrodos
- 7.5 Aplicaciones de láminas de aleación de tungsteno en tarjetas
  - 7.5.1 Tarjetas bancarias y tarjetas de pago de aleación de tungsteno
  - 7.5.2 Etiquetas de identificación para mascotas de aleación de tungsteno

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.5.3 Tarjetas conmemorativas y personalizadas de festivales de aleación de tungsteno
- 7.5.4 Etiquetas de gestión industrial y de activos de aleación de tungsteno
- 7.5.5 Etiquetas colgantes de aleación de tungsteno para ropa y artículos de lujo
- 7.5.6 Tarjetas de presentación de alta gama y tarjetas de etiqueta social de aleación de tungsteno

## **Capítulo ocho: Problemas comunes y soluciones para láminas de aleación de tungsteno**

- 8.1 Problemas y soluciones de la base material para láminas de aleación de tungsteno
  - 8.1.1 Problemas relacionados con la composición y la estructura
    - 8.1.1.1 Problemas de composición desigual en aleaciones de tungsteno y métodos de homogeneización
    - 8.1.1.2 Tipos de defectos en la estructura cristalina y estrategias de reparación
  - 8.1.2 Problemas de desviación de propiedades físicas en láminas de aleación de tungsteno
    - 8.1.2.1 Causas y técnicas de ajuste para densidad y dureza anormales
    - 8.1.2.2 Problemas de conductividad térmica y expansión térmica desadaptadas y soluciones de optimización
- 8.2 Problemas y soluciones de producción y fabricación de láminas de aleación de tungsteno
  - 8.2.1 Problemas del proceso de pulvimetalurgia
    - 8.2.1.1 Medidas de identificación y control de defectos en la preparación de polvos
    - 8.2.1.2 Diagnóstico y mejora de procesos para fallas del proceso de sinterización
  - 8.2.2 Problemas de laminado y conformado
    - 8.2.2.1 Causas y métodos de prevención de grietas por laminación en caliente
    - 8.2.2.2 Análisis y control de la deformación en problemas de deformación por trabajo en frío
  - 8.2.3 Problemas de inspección y control de calidad
    - 8.2.3.1 Dificultades de aplicación de la tecnología de ensayos no destructivos y soluciones alternativas
    - 8.2.3.2 Manejo de desviaciones de tolerancia dimensional y mejora de la precisión
- 8.3 Problemas y soluciones de aplicación y rendimiento para láminas de aleación de tungsteno
  - 8.3.1 Problemas de aplicación de las láminas de aleación de tungsteno en la industria aeroespacial
    - 8.3.1.1 Mecanismos de falla por fatiga a alta temperatura y tratamientos de fortalecimiento
    - 8.3.1.2 Problemas de vibración y cargas de impacto y diseño resistente al impacto
  - 8.3.2 Problemas de aplicación de las láminas de aleación de tungsteno en el blindaje contra la radiación
    - 8.3.2.1 Causas de la atenuación de la eficiencia del blindaje y recuperación de la eficiencia
    - 8.3.2.2 Evaluación de riesgos de biocompatibilidad y mejoras de seguridad
  - 8.3.3 Problemas de aplicación de las láminas de aleación de tungsteno en equipos electrónicos y médicos
    - 8.3.3.1 Solución de problemas de conductividad y magnetismo anormales y modificación del material
    - 8.3.3.2 Protección contra problemas de corrosión y oxidación y tecnología de recubrimiento

## **Apéndices:**

- Apéndice A Normas chinas para láminas de aleación de tungsteno
  - Apéndice B Normas internacionales para láminas de aleación de tungsteno
  - Apéndice C Normas para láminas de aleación de tungsteno en Europa, América, Japón, Corea y otros países
  - Apéndice D Tabla de terminología para láminas de aleación de tungsteno
- Referencias.

### **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 1: Comprensión básica de las láminas de aleación de tungsteno

### 1.1 El concepto de láminas de aleación de tungsteno

Las láminas de aleación de tungsteno son materiales cuyo componente principal es el tungsteno, que se alea y procesa para formar láminas delgadas. Este material desempeña un papel importante en aplicaciones industriales, ya que combina la alta densidad y el alto punto de fusión del tungsteno con un mejor rendimiento de procesamiento y comportamiento mecánico gracias a la adición de otros elementos. La aparición de las láminas de aleación de tungsteno ha permitido que el tungsteno, un metal que antes era difícil de procesar, se utilice en forma de lámina en diversas aplicaciones de ingeniería.

Las láminas de aleación de tungsteno suelen basarse en un alto contenido de tungsteno, junto con otros elementos seleccionados para optimizar el rendimiento general. Los sistemas de aleación comunes incluyen combinaciones de tungsteno con níquel, hierro o cobre, que forman una fase aglutinante durante la sinterización, lo que facilita la adhesión de las partículas de tungsteno. El espesor de la lámina suele controlarse con una precisión de unos pocos milímetros, o incluso micrométrica, según el proceso de fabricación específico y los requisitos de la aplicación. El proceso de producción comienza con la mezcla de polvos, seguida del prensado, la sinterización, el trabajo en caliente y el trabajo en frío, obteniendo así láminas con superficies lisas y bordes regulares.

En términos de rendimiento, las láminas de aleación de tungsteno presentan una buena distribución de la densidad, lo que las hace excelentes para aplicaciones que requieren un peso concentrado. Además, poseen cierta ductilidad, lo que facilita las operaciones posteriores de doblado, estampado o corte. El proceso de tratamiento térmico es crucial; al controlar la temperatura y la velocidad de enfriamiento, se puede ajustar el tamaño del grano y la distribución de fases del material, lo que influye en el equilibrio entre dureza y tenacidad.

Las láminas de aleación de tungsteno enfatizan la aplicación integral de la ingeniería de materiales. No se trata simplemente de laminar tungsteno más delgado, sino de alearlo para transformar la fragilidad en maquinabilidad. Este material está ganando aceptación en electrónica, dispositivos médicos e instrumentos de precisión gracias a su estabilidad dimensional y adaptabilidad ambiental. Gracias a los avances en tecnologías de fabricación como el corte por láser y el laminado de precisión, la gama de especificaciones de las láminas de aleación de tungsteno continúa expandiéndose, satisfaciendo diversas necesidades de diseño.

#### 1.1.1 Definición de láminas de aleación de tungsteno

Las láminas de aleación de tungsteno se definen como materiales de aleación delgados, similares a láminas, fabricados con tungsteno como matriz, con la adición de pequeñas cantidades de otros elementos metálicos como níquel, hierro o cobre, preparados mediante pulvimetalurgia y laminados. El tungsteno suele predominar en la composición, lo que confiere al material sus propiedades fundamentales de alta

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



densidad y dureza, mientras que la adición de elementos de aleación mejora significativamente la plasticidad y la adaptabilidad del material al procesamiento.

Por definición, la diferencia clave entre las láminas de aleación de tungsteno y otros productos de tungsteno reside en su forma laminar y la composición de la aleación. Durante el proceso de fabricación, el polvo de tungsteno se mezcla uniformemente con otros polvos metálicos y luego se sinteriza en fase líquida a alta temperatura para formar una microestructura densa. Posteriormente, se diluye gradualmente hasta alcanzar el espesor deseado mediante múltiples pasadas de laminación, acompañadas de un recocido para liberar la tensión interna. Esta definición refleja la cadena completa de transformación del material, desde el polvo hasta el producto final.

En las definiciones prácticas, también debe considerarse la clasificación de las series de aleaciones. Por ejemplo, la serie tungsteno-níquel-hierro prioriza el equilibrio de las propiedades mecánicas, mientras que la serie tungsteno-níquel-cobre se centra más en la conductividad eléctrica. Todas estas series se definen en torno al alto punto de fusión del tungsteno, lo que garantiza que el material mantenga la estabilidad de su forma a altas temperaturas.

de tungsteno también se aplican a su posicionamiento funcional; son materiales de ingeniería de alto rendimiento, ideales para aplicaciones que requieren una combinación de alta densidad y buena conformabilidad. Esta definición no es estática; con la exploración de nuevos elementos de aleación, como la adición de molibdeno o renio, se enriquece constantemente para adaptarse a las aplicaciones emergentes.

### 1.1.2 Definición y distinción con materiales relacionados

de tungsteno de otros materiales requieren un análisis desde múltiples dimensiones, incluida la composición, el método de procesamiento, las características de rendimiento y el posicionamiento de la aplicación, para garantizar que se evite la confusión al seleccionar los materiales.

La principal consideración es la comparación con las láminas de tungsteno puro. Las láminas de tungsteno puro prácticamente no contienen elementos de aleación y su producción se basa en el laminado de polvo de tungsteno de alta pureza. Sin embargo, debido a la fragilidad del tungsteno a temperatura ambiente, el procesamiento debe realizarse a altas temperaturas, lo que hace que el producto final sea propenso al agrietamiento. Las láminas de aleación de tungsteno, por otro lado, introducen una fase aglutinante mediante la aleación, lo que permite su laminado a temperaturas más bajas, lo que resulta en una calidad superficial superior y su idoneidad para una gama más amplia de operaciones de conformado.

También es necesario distinguir las láminas compuestas de tungsteno y cobre. Este material es principalmente una mezcla mecánica de partículas de tungsteno y fases de cobre, con un alto contenido de cobre, y se prepara mediante un método de infiltración por fusión en lugar de sinterización de aleación. Por el contrario, las láminas de aleación de tungsteno forman una estructura de solución sólida, con una

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

miscibilidad más uniforme entre el cobre o el hierro y el níquel, lo que resulta en diferencias en el coeficiente de expansión térmica y la conductividad térmica.

Las láminas de aleación de molibdeno son otra comparación común. El molibdeno tiene una densidad y un punto de fusión más bajos que el tungsteno, y sus láminas funcionan bien en entornos de vacío, pero su resistencia a altas temperaturas no es tan buena como la de las láminas de aleación de tungsteno. Las láminas de molibdeno son más adecuadas para dispositivos electrónicos de vacío, mientras que las láminas de aleación de tungsteno son más ventajosas en aplicaciones que requieren mayor inercia de masa.

A diferencia de las láminas de carburo cementado, las láminas de aleación de tungsteno no contienen fases de carburo. Las láminas de carburo cementado se componen principalmente de partículas de carburo de tungsteno y aglutinantes de cobalto, presentando una dureza extremadamente alta pero una tenacidad limitada, y se utilizan principalmente en herramientas de corte. Las láminas de aleación de tungsteno, por otro lado, priorizan el equilibrio entre densidad y ductilidad, lo que las hace adecuadas para equilibrar componentes o proteger piezas.

Estas definiciones definen claramente la posición de las láminas de aleación de tungsteno: son láminas que equilibran densidad, procesabilidad y estabilidad, cubriendo así las deficiencias de rendimiento específicas de la industria civil. Esta distinción ayuda a los ingenieros a adaptar los materiales a las necesidades específicas.

## 1.2 Importancia del desarrollo y la investigación de las láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno han experimentado una completa evolución, desde la búsqueda de características de rendimiento individuales hasta la optimización integral del rendimiento. Su desarrollo se debe tanto a las características de los recursos de tungsteno como a los avances en la tecnología de procesamiento, así como a la continua demanda industrial de materiales de alta densidad y alta estabilidad. Los primeros materiales de tungsteno se presentaban principalmente en formas simples, como filamentos y blancos de pulverización catódica. Con la mejora de los procesos de pulvimetalurgia y la creciente demanda de maquinabilidad de materiales de alta densidad, las láminas de aleación de tungsteno se convirtieron gradualmente en una línea de investigación y producción independiente. A mediados y finales del siglo XX, la madurez de la tecnología de sinterización en fase líquida proporcionó un método fiable para densificar las aleaciones de tungsteno, y la posterior introducción de los procesos de laminado multipaso y recocido controlado materializó la transformación de la morfología de láminas voluminosas a láminas delgadas. Este proceso no solo amplió las posibilidades de aplicación del tungsteno, sino que también sentó las bases para su posterior funcionalización y diseño ligero. En la actualidad, la investigación sobre láminas de aleación de tungsteno se ha expandido desde los sistemas tradicionales de tungsteno-níquel-hierro y tungsteno-níquel-cobre a múltiples direcciones de vanguardia, como el dopaje de tierras raras, el fortalecimiento nanocristalino y el diseño de estructuras de gradiente, lo que refleja una tendencia de integración profunda entre la ciencia de los materiales y las necesidades de ingeniería.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 1.2.1 Contexto de desarrollo basado en la utilización de recursos de tungsteno

Como metal estratégico con reservas relativamente limitadas pero de amplia distribución, el uso eficiente del tungsteno siempre ha sido un aspecto importante del desarrollo de materiales. Los primeros recursos de tungsteno se utilizaban principalmente para la producción de carburo cementado, mientras que el mineral de baja ley o los materiales reciclados restantes eran difíciles de procesar. La aparición de láminas de aleación de tungsteno ha abierto una nueva vía de conversión para los recursos de tungsteno de ley media y baja, permitiendo que el polvo de tungsteno, que antes era potencialmente desperdiciado, se incorpore a yacimientos de alto valor añadido.

Alrededor de la década de 1950, los investigadores descubrieron que la adición de ferroníquel o cobreníquel podía reducir significativamente la temperatura de transición frágil del tungsteno. Este descubrimiento condujo directamente al desarrollo de la primera generación de aleaciones pesadas de tungsteno, utilizadas principalmente a granel para componentes de equilibrio civiles. Posteriormente, con los avances en la precisión de los equipos de laminación y los procesos de recocido, el espesor disminuyó gradualmente desde el centímetro inicial hasta el milímetro, y luego hasta las decenas de micrómetros actuales, logrando un cambio en la utilización de recursos de extensiva a intensiva. En el siglo XXI, la aplicación industrial de tecnologías avanzadas de sinterización, como el prensado isostático en caliente y la sinterización por plasma de chispa, ha mejorado aún más la densidad de la palanquilla y la uniformidad de la microestructura, ha reducido las pasadas de laminación posteriores y ha disminuido el consumo de energía y las tasas de pérdida de tungsteno.

En los últimos años, la producción de láminas de aleación de tungsteno se ha centrado en el reciclaje de recursos a lo largo de todo el proceso. Por ejemplo, los materiales de desecho, las incrustaciones de óxido laminado y las piezas desechadas del procesamiento de la aleación de tungsteno pueden reconvertirse en polvo de tungsteno de alta pureza mediante reducción de hidrógeno o fusión de zinc, y luego reintroducirse en el proceso de dosificación, formando un sistema de utilización de circuito cerrado relativamente completo. Simultáneamente, en respuesta a la disminución de la calidad de los recursos de tungsteno, algunas instituciones de investigación intentan reducir el contenido de tungsteno o reemplazarlo parcialmente con molibdeno o tántalo, manteniendo su rendimiento, creando así un sistema de aleación que ahorra recursos. Se puede decir que la trayectoria de desarrollo de las láminas de aleación de tungsteno es un microcosmos de la evolución de los recursos de tungsteno desde un modelo de utilización de "alta pureza y alto consumo" a uno de "alta eficiencia y circular". Este proceso refleja tanto el progreso tecnológico como las exigencias del desarrollo sostenible.

### 1.2.2 Láminas de aleación de tungsteno desde una perspectiva de ingeniería química

Desde la perspectiva de la ingeniería química, la investigación y el desarrollo de láminas de aleación de tungsteno representan soluciones de ingeniería para problemas fundamentales como las reacciones multifásicas, el control de la interfaz de fases y la optimización de la transferencia de calor y masa. La sinterización en fase líquida en la pulvimetalurgia es una operación unitaria típica en ingeniería química, que implica la reorganización de partículas de tungsteno, la humectación y la dispersión de la fase

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aglutinante, los mecanismos de disolución-reprecipitación y la cinética de escape de gases. Los investigadores han logrado un control preciso de la porosidad, la distribución de la fase aglutinante y la esferoidización de partículas de tungsteno mediante el ajuste de parámetros como los perfiles de temperatura de sinterización, el punto de rocío de hidrógeno y los métodos de carga de palanquilla. Se trata, en esencia, de una aplicación interdisciplinaria de la ingeniería de reacciones químicas y la ciencia de los materiales.

Las etapas de laminado y recocido implican el acoplamiento de los campos de tensión y difusión. La simulación de elementos finitos y los métodos de dinámica de fluidos computacional, comúnmente utilizados en ingeniería química, se han aplicado ampliamente para analizar la distribución de la temperatura y la tensión durante el laminado, así como el comportamiento de la difusión de los elementos durante el recocido. Esto ayuda a optimizar la reducción de pasadas y los regímenes de recocido intermedio, reduciendo defectos como la delaminación y el agrietamiento de los bordes. Además, los tratamientos superficiales, como el recubrimiento químico y el tratamiento térmico al vacío, también son operaciones unitarias típicas de la ingeniería química que afectan directamente la resistencia a la oxidación y la resistencia de la unión del material laminar.

Además, la investigación sobre el comportamiento de las láminas de aleación de tungsteno en medios corrosivos proporciona datos de referencia importantes para la selección de materiales en equipos químicos. A través de pruebas electroquímicas y experimentos de inmersión, los investigadores han establecido modelos de velocidad de corrosión para diferentes sistemas de aleación en entornos ácidos, alcalinos y salinos, proporcionando apoyo teórico para extender la vida útil y reducir los costos de mantenimiento. Desde una perspectiva de ingeniería química, las láminas de aleación de tungsteno no solo son el producto final, sino también el resultado de una serie altamente integrada de procesos químicos y físicos precisos y controlables. Su valor de investigación radica en proporcionar experiencia replicable para la ampliación de ingeniería de materiales multifásicos de alto punto de fusión similares.

### 1.2.3 El estado de las láminas de aleación de tungsteno en los campos de aplicación

Las láminas de aleación de tungsteno se han consolidado como indispensables en el sistema industrial moderno, principalmente debido a la exigencia de un equilibrio entre alta densidad y buena maquinabilidad. En el sector de los dispositivos médicos, las láminas de aleación de tungsteno, gracias a su excelente capacidad de atenuación de la radiación y biocompatibilidad, se han convertido en el material predilecto para componentes esenciales como colimadores y rejillas multiláminas en equipos de radioterapia de alta gama. La precisión de su espesor y la calidad de su superficie influyen en la precisión del posicionamiento del tratamiento.

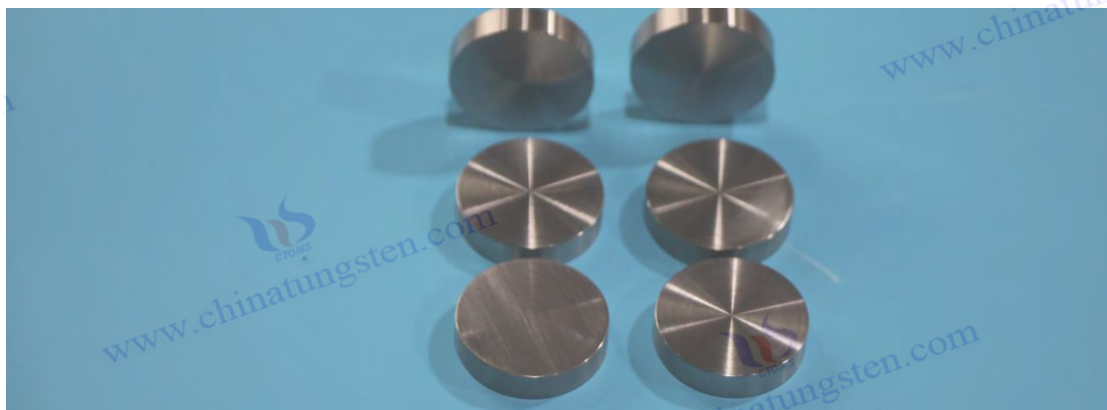
En instrumentos de precisión y la industria electrónica, las láminas de aleación de tungsteno se utilizan como componentes de control de vibraciones y piezas de blindaje electromagnético, aprovechando las ventajas inerciales de su alta densidad y conductividad moderada. En instrumentos analíticos, balanzas de alta precisión, sistemas de navegación inercial y otros equipos, las láminas de aleación de tungsteno ayudan a lograr un equilibrio entre miniaturización y alta estabilidad.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Además, las láminas de aleación de tungsteno están ocupando gradualmente un lugar importante en el recubrimiento al vacío y la gestión térmica. Como material de placa posterior o disipador de calor para objetivos de pulverización catódica, equilibra los requisitos de alta conductividad térmica y baja expansión térmica. En los últimos años, con el rápido desarrollo de las nuevas energías y la tecnología de la información de última generación, la demanda de materiales de interfaz térmica y materiales de blindaje de alto rendimiento ha seguido creciendo. Las láminas de aleación de tungsteno, con su combinación única de propiedades, se están extendiendo de las aplicaciones tradicionales a campos emergentes.

Cabe destacar que las láminas de aleación de tungsteno no se utilizan de forma aislada, sino que complementan otros materiales de alto rendimiento. En algunos casos, se utilizan junto con aleaciones de titanio y compuestos de fibra de carbono para lograr un equilibrio entre ligereza y funcionalidad. Esta capacidad de realizar funciones clave de forma independiente, a la vez que colabora con otros materiales, ha consolidado la posición de las láminas de aleación de tungsteno en el espectro de materiales industriales modernos. Con las mejoras en la precisión de procesamiento y las tecnologías de tratamiento de superficies, sus áreas de aplicación aún tienen un amplio margen de expansión.



CTIA GROUP LTD Láminas 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 dos: Sistema de clasificación de láminas de aleación de tungsteno

### 2.1 Láminas de aleación de tungsteno según la composición del material

La clasificación de [las láminas de aleación de tungsteno](#) por composición del material es el método más común e intuitivo. Esta clasificación refleja las diferencias en la composición química de la fase aglutinante, determinando así las diferencias sistemáticas en las propiedades mecánicas, termofísicas, electromagnéticas y adaptabilidad al procesamiento. Actualmente, casi todas las láminas de aleación de tungsteno producidas industrialmente utilizan níquel como principal elemento aglutinante porque el níquel tiene buena humectabilidad al tungsteno, moderada capacidad de sinterización por activación y un pequeño desajuste de expansión térmica con el tungsteno. Con base en los diferentes componentes secundarios, se han formado dos series principales: níquel-hierro y níquel-cobre. Además, existen pequeñas cantidades de níquel- molibdeno, níquel- renio u otros sistemas experimentales, pero estos aún no han alcanzado la producción de láminas a gran escala. El contenido de tungsteno de los dos sistemas principales suele estar entre el 90% y el 97%, y la cantidad total de fase aglutinante se controla entre el 3% y el 10%. Al ajustar la relación y los parámetros de procesamiento termomecánico, las propiedades finales se pueden controlar dentro de un amplio rango.

#### 2.1.1 Lámina de aleación de níquel-hierro y tungsteno

Las láminas de aleación de níquel-hierro y tungsteno fueron el primer tipo de lámina de aleación de tungsteno en industrializarse y aún dominan el mercado. Su composición típica oscila entre el 90 % y el 97 % de W, el 2,5 % y el 7 % de Ni y el 0,5 % y el 3 % de Fe, con una relación másica de Ni/Fe que suele mantenerse entre 7:3 y 8:2. Este diseño de relación se deriva de un exhaustivo análisis experimental realizado a mediados del siglo XX, que demostró que este rango permite formar una cantidad adecuada de fase líquida durante la etapa de sinterización en fase líquida, lo que promueve una reorganización adecuada de las partículas de tungsteno y evita la aglomeración excesiva de la fase aglutinante o la aparición de fases frágiles.

El sistema níquel-hierro se caracteriza por una solución sólida de hierro-níquel en la fase aglutinante, con un ferromagnetismo significativo, lo que resulta en una fuerte respuesta magnética general en el material. Esta característica le confiere una ventaja natural en aplicaciones que requieren blindaje magnético o magneto- actuación. Simultáneamente, la adición de hierro reduce significativamente la energía de falla de apilamiento de la fase aglutinante, lo que promueve el proceso de disolución-reprecipitación en las etapas posteriores de la sinterización, lo que hace que las partículas de tungsteno sean más esféricas y resulta en una mayor resistencia de la unión interfacial entre las fases de tungsteno y aglutinante. Macroscópicamente, esto se manifiesta en una mayor resistencia a la tracción y tenacidad a la fractura.

En el procesamiento de chapa, los sistemas de níquel-hierro presentan buena termoplaticidad y propiedades de trabajo en frío. Tras la sinterización a alta temperatura, la palanquilla puede laminarse en caliente varias veces a 1100 °C–1300 °C, seguida de un recocido intermedio y un laminado en frío para

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

obtener un espesor inferior a 0,05 mm. La aparición de grietas en los bordes es menos probable durante el laminado, lo que resulta en un alto rendimiento. El régimen de tratamiento térmico influye significativamente en las propiedades finales: el recocido a baja temperatura y de larga duración conserva las partículas finas de tungsteno y la estructura fibrosa, logrando una mayor resistencia; el recocido a alta temperatura y de corta duración promueve el engrosamiento de las partículas de tungsteno y la homogeneización de la fase aglutinante, mejorando así la ductilidad.

En cuanto al tratamiento superficial, las láminas de aleación de níquel-hierro-tungsteno se pueden recubrir fácilmente sin corriente eléctrica con níquel, oro o plata, y también pueden someterse a un aluminizado por difusión en un entorno de vacío para formar una capa protectora, lo que mejora aún más su resistencia a la oxidación y la corrosión. Actualmente, esta serie de láminas se utiliza ampliamente en componentes de precisión civiles que requieren alta densidad y un cierto nivel de fiabilidad mecánica, como pesas para balanzas analíticas de alta gama, bloques de balanza para instrumentos inerciales y láminas amortiguadoras de vibraciones para instrumentos ópticos. Gracias a los avances en equipos de laminación y tecnología de tratamiento térmico, la uniformidad de espesor y la planitud de las láminas de aleación de níquel-hierro-tungsteno han alcanzado el nivel micrométrico, cumpliendo así con los estrictos requisitos de los instrumentos de alta gama para desviaciones de calidad mínimas.

### 2.1.2 Lámina de aleación de níquel-cobre y tungsteno

Las láminas de aleación de tungsteno y níquel-cobre son láminas de aleación de tungsteno no magnéticas, desarrolladas a partir de aleaciones de níquel-hierro. Su composición típica es de 90 % a 96 % W, 3 % a 8 % Ni y 1 % a 5 % Cu, con una relación másica de Ni/Cu típicamente entre 3:1 y 7:3. La introducción del cobre elimina por completo el ferromagnetismo macroscópico del material, lo que lo convierte en la mejor opción para entornos con campos magnéticos intensos o requisitos de alta compatibilidad electromagnética. Simultáneamente, la alta conductividad térmica y eléctrica del cobre confiere a esta serie de láminas una difusión térmica y un rendimiento de contacto eléctrico superiores.

Desde una perspectiva microscópica, la fase aglutinante en el sistema níquel-cobre también es una solución sólida cúbica centrada en las caras. Sin embargo, debido a la miscibilidad infinita del cobre y el níquel, la fase aglutinante exhibe una mejor uniformidad compositiva. La temperatura de emergencia de la fase líquida durante la sinterización es ligeramente inferior a la del sistema níquel-hierro, lo que favorece la disminución de la temperatura de sinterización y la reducción del crecimiento anormal de partículas de tungsteno. El grado de esferoidización de las partículas de tungsteno es generalmente superior al del sistema níquel-hierro, lo que resulta en una mayor limpieza de la interfaz. Esto suele producir una elongación ligeramente superior para el mismo contenido de tungsteno, pero una ligera disminución de la resistencia a la tracción, lo que refleja un equilibrio entre resistencia y plasticidad.

En cuanto a las características de procesamiento, las aleaciones de níquel-cobre son más sensibles a la oxidación. El laminado a alta temperatura debe realizarse en atmósfera protectora o al vacío; de lo contrario, se forma fácilmente una capa de óxido suelta en la superficie, lo que afecta al laminado en frío posterior. La velocidad de endurecimiento por amolado en frío es ligeramente inferior a la de las

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



aleaciones de níquel-hierro, lo que las hace adecuadas para el laminado de alta reducción y ventajosas para la producción de láminas ultrafinas (con espesores de hasta 20  $\mu\text{m}$ ). La ventana de recocido es amplia y el material no es sensible al sobrecalentamiento, lo que facilita las líneas de producción continuas.

En cuanto al tratamiento superficial, las aleaciones de níquel-cobre poseen una buena resistencia a la corrosión y buenas propiedades de contacto eléctrico, por lo que a menudo solo requieren un pulido directo o una limpieza química ligera para cumplir con los requisitos, eliminando así la necesidad de complejos procesos de recubrimiento. En cuanto a sus aplicaciones, esta serie de láminas se utiliza principalmente en álabes de colimadores para equipos de radioterapia médica, cubiertas de blindaje electromagnético, placas traseras para objetivos de pulverización catódica al vacío, disipadores de calor y otras aplicaciones que requieren alta conductividad térmica o eléctrica, no magnética. En los últimos años, debido a la creciente demanda de disipación de calor en las comunicaciones 5G y los dispositivos electrónicos de alta potencia, las aplicaciones de adelgazamiento y compuestos de las láminas de aleación de níquel-cobre y tungsteno se han expandido rápidamente, demostrando un gran dinamismo.

### 2.1.3 Lámina de aleación de tungsteno y cobre

Las láminas de aleación de tungsteno-cobre ocupan una posición especial en el sistema de clasificación. En sentido estricto, pertenecen a pseudoaleaciones o compuestos de matriz metálica, en lugar de aleaciones de tungsteno en solución sólida en el sentido tradicional. Su composición típica oscila entre el 50 % y el 90 % de W y el 10 % y el 50 % de Cu, siendo ambas fases prácticamente inmiscibles. El cobre se distribuye en una red continua o semicontinua dentro de la estructura del tungsteno. Debido a la ausencia de una fase aglutinante de aleación, las láminas de tungsteno-cobre difieren fundamentalmente de las láminas de aleación de tungsteno a base de níquel mencionadas anteriormente en cuanto a microestructura, características de rendimiento y métodos de procesamiento.

Las láminas de tungsteno-cobre emplean principalmente el método de infiltración por fusión o el método de sinterización por activación directa. El método de infiltración por fusión primero prensa y sinteriza una estructura porosa de tungsteno, luego permite que el cobre fundido se infiltre en los poros a una temperatura ligeramente superior al punto de fusión del cobre. La sinterización por activación, por otro lado, implica premezclar una pequeña cantidad de níquel o cobalto en polvo de tungsteno y densificarlo directamente en un solo paso a 1300°C–1400°C. Ambos procesos producen láminas con una conductividad térmica y eléctrica extremadamente alta, que generalmente oscila entre 180 y 220 W/(m · K), y una conductividad eléctrica que alcanza el 40%–55% IACS, con un coeficiente de expansión térmica que se adapta bien a los materiales semiconductores.

En el procesamiento de láminas, el cobre tungsteno exhibe excelentes propiedades de trabajo en caliente y en frío gracias a la presencia de la fase de cobre. Los grados con un contenido de tungsteno del 70% al 80% se pueden laminar directamente a temperatura ambiente con grandes reducciones, alcanzando fácilmente un espesor final inferior a 0,1 mm con un alto acabado superficial y prácticamente sin necesidad de recocido intermedio. Cuando el contenido de tungsteno supera el 85%, se requiere

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

laminação en caliente y atmósfera protectora. Las principales ventajas de las láminas de cobre tungsteno son su naturaleza no magnética, su excelente conductividad térmica y su alta resistencia a la erosión por arco. Por lo tanto, han ganado un amplio reconocimiento en los sectores civil e industrial, donde los contactos eléctricos de alta tensión, los electrodos de interruptores de vacío, los electrodos de soldadura por resistencia, los disipadores de calor de encapsulados electrónicos y los revestimientos de garganta de toberas de motores de cohetes requieren resistencia simultánea a altas temperaturas, arcos eléctricos y choque térmico. En los últimos años, con el crecimiento explosivo de la demanda de disipación de calor en módulos IGBT de alta potencia y sustratos semiconductores de tercera generación, las láminas de cobre de tungsteno ultradelgadas con alto contenido de tungsteno (espesor  $<0,3$  mm, contenido de tungsteno  $\geq 85\%$ ) se han convertido en un foco de investigación y producción.

#### 2.1.4 Lámina de aleación de tungsteno y plata

Las láminas de aleación de tungsteno y plata también pertenecen a un sistema de pseudoaleación, con plata como fase blanda y altamente conductora y tungsteno como estructura dura; ambos son mutuamente insolubles. Su composición suele consistir en un 50%–80% de W y un 20%–50% de Ag. El proceso de preparación es muy similar al de las aleaciones de tungsteno y cobre, utilizando principalmente fusión e infiltración a alta temperatura, pero también puede emplearse la mezcla de polvos seguida de solidificación a alta presión. Dado que la plata tiene un punto de fusión más bajo ( $961^{\circ}\text{C}$ ) que el cobre, la temperatura de fusión e infiltración es correspondientemente menor, lo que resulta en una ventana de proceso más amplia y requisitos de equipo más suaves.

Las láminas de tungsteno-plata superan a las de tungsteno-cobre tanto en conductividad eléctrica como térmica. La conductividad eléctrica alcanza fácilmente el 60%–80% IACS, y la conductividad térmica varía de  $250$  a  $380\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , manteniendo la alta dureza y resistencia a la ablación del tungsteno. Más importante aún, el óxido de plata formado bajo un arco eléctrico tiene una alta presión de vapor, lo que elimina fácilmente el daño térmico, lo que le da al material una excelente resistencia a la erosión por arco y a la soldadura. En términos de rendimiento de procesamiento, las láminas de tungsteno-plata con un contenido de plata del 30% o superior se pueden laminar por debajo de  $0,05$  mm en un estado casi completamente frío, con un agrietamiento mínimo en los bordes y una superficie blanca plateada que exhibe un excelente atractivo visual. Actualmente, las láminas de tungsteno-plata se utilizan principalmente en contactos eléctricos de baja y media tensión, contactos de relés de precisión, contactos eléctricos deslizantes y como sustratos para el recubrimiento de las paredes internas de ciertas guías de ondas especiales. En campos como los interruptores automáticos de alta gama para uso civil, los relés de automoción y los relés de aviación, las láminas de tungsteno-plata han sustituido gradualmente a los materiales tradicionales de plata-cadmio y plata-níquel gracias a su larga vida útil, baja resistencia de contacto y baja transferencia de material.

#### 2.1.5 Otras láminas de aleación de tungsteno en fase aglutinante

Además de los sistemas convencionales mencionados, en los últimos años han surgido láminas de aleación de tungsteno que utilizan fases aglutinantes novedosas o compuestas. Estas se encuentran

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

principalmente en la fase de transición del laboratorio a la industrialización, o se producen en lotes pequeños para satisfacer requisitos funcionales específicos.

Sistema tungsteno-níquel-cobalto: Agregar entre 1% y 3% de cobalto a una base de níquel-hierro o níquel-cobre puede mejorar significativamente la resistencia de la fase aglutinante y la capacidad de resistir el ablandamiento a altas temperaturas, lo que lo hace adecuado para disipadores de calor o componentes estructurales que requieren temperaturas de funcionamiento más altas.

Sistema de tungsteno-níquel-molibdeno: Al sustituir parcialmente el tungsteno por molibdeno (entre un 5 % y un 20 %), se reduce el coeficiente de expansión térmica general, manteniendo al mismo tiempo una alta densidad, lo que mejora la adaptación térmica con la cerámica o el vidrio. Se utiliza a menudo en carcasas de embalaje electrónico o láminas de transición para sellado al vacío.

Sistema de tierras raras de tungsteno: la adición de trazas de óxidos de tierras raras como  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  y  $\text{CeO}_2$  mejora la temperatura de recristalización y la resistencia a altas temperaturas a través del mecanismo de fortalecimiento por dispersión, al mismo tiempo que refina los granos de tungsteno y mejora la resistencia a las grietas durante el laminado de láminas delgadas.

TiC, Se añaden ZrC y otras partículas de carburo a la fase aglutinante a base de níquel para formar un refuerzo de tercera fase, lo que mejora significativamente la dureza y la resistencia al desgaste. Se utiliza principalmente para revestimientos resistentes al desgaste o insertos de moldes de precisión.

Sistema aglutinante de tungsteno de alta entropía: una nueva línea de investigación que utiliza polvos de aleación de alta entropía, como FeCoNiCrMn y FeCoNiCrAl, como fases aglutinantes para lograr mayor resistencia y resistencia a la oxidación, manteniendo una alta densidad. Actualmente, se encuentra en fase de lámina de laboratorio.

## 2.2 Láminas de aleación de tungsteno de Core Performance

La clasificación de las láminas de aleación de tungsteno según sus propiedades principales refleja la demanda directa de la función principal del material en aplicaciones de ingeniería. Actualmente, las láminas de aleación de tungsteno se pueden clasificar en tres categorías según sus propiedades principales: alta densidad, alta dureza y resistencia a la corrosión/resistencia al desgaste. Si bien existe cierta superposición entre estas tres categorías, sus funciones principales difieren.

### 2.2.1 Lámina de aleación de tungsteno de alta densidad

Las láminas de aleación de tungsteno de alta densidad son las más producidas y utilizadas. Su principal objetivo de diseño es maximizar la densidad teórica, manteniendo al mismo tiempo la maquinabilidad y la fiabilidad mecánica necesarias. Las densidades típicas oscilan entre 17,0 y 18,8 g/cm<sup>3</sup>, llegando en algunos casos a casi 19,0 g/cm<sup>3</sup>, superando con creces a la mayoría de los metales de ingeniería.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Estas láminas están compuestas casi en su totalidad por aleaciones de níquel-hierro o níquel-cobre con un contenido de tungsteno del 93% al 97%, y la fase aglutinante total se controla entre el 3% y el 7%. Para aproximarse aún más a la densidad teórica, se suele utilizar polvo fino de tungsteno de alta pureza, un tiempo de sinterización en fase líquida prolongado y un prensado secundario tras el prensado isostático en caliente para reducir la porosidad por debajo del 0,1%. El proceso de laminado consiste principalmente en un laminado en caliente de gran reducción, seguido de un laminado en frío multipasada, junto con un estricto recocido intermedio al vacío para garantizar que la desviación de la uniformidad de la densidad en la dirección del espesor no supere el 0,5%.

Las láminas de aleación de tungsteno de alta densidad presentan ventajas significativas en aplicaciones que requieren masa concentrada y volumen reducido. En el campo médico, los colimadores multiláminas de equipos de radioterapia suelen utilizar láminas de 93W-4.9Ni-2.1Fe de 0,15 a 0,5 mm de espesor. Su alta densidad mejora la eficiencia del blindaje radiológico y ahorra volumen, lo que mejora directamente la precisión del tratamiento y la rotación de la cama. En el campo de los instrumentos de precisión, este material también se utiliza ampliamente para contrapesos y platos de equilibrio en balanzas analíticas, giroscopios y sistemas de navegación inercial. El espesor suele estar entre 0,05 y 2 mm, con una tolerancia de densidad de  $\pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ .

En los últimos años, ante la creciente demanda de contrapesos locales en vehículos eléctricos y dispositivos portátiles, las láminas de aleación de tungsteno de alta densidad han comenzado a desarrollarse hacia un acabado superficial ultrafino ( $< 0,1 \text{ mm}$ ) y de alta calidad ( $R_a \leq 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ ). Algunos productos de alta gama han logrado laminación compuesta con polímeros o aleaciones de aluminio, ampliando aún más su campo de aplicación en el sector de la electrónica de consumo.

### 2.2.2 Lámina de aleación de tungsteno de alta dureza

Las láminas de aleación de tungsteno de alta dureza priorizan la mejora significativa de la dureza superficial y general, requiriendo típicamente una dureza Vickers de entre 380 y 550 HV30, con algunos grados reforzados que superan los 600 HV30. Este tipo de lámina logra una mejora de la dureza mediante tres métodos: optimización de la composición, refuerzo por deformación y dispersión de segunda fase.

Los enfoques técnicos comunes incluyen: aumentar el contenido de tungsteno al 95%–98% para reducir la proporción de fase aglutinante blanda; usar una fase aglutinante de alto contenido de cobalto-níquel-hierro (contenido de Co 3%–8%) para utilizar los efectos de fortalecimiento de la solución sólida y el fortalecimiento de la precipitación del cobalto; laminado en frío con una tasa de procesamiento total superior al 70% para formar una textura fibrosa fuerte y dislocaciones de alta densidad; introducir partículas de carburo como TiC, ZrC y WC (fracción de volumen 2%–8%) para el fortalecimiento de la dispersión; y envejecimiento a largo plazo a baja temperatura para precipitar compuestos intermetálicos finos de la fase aglutinante.

Las láminas de aleación de tungsteno de alta dureza mejoran significativamente la resistencia al rayado, a la indentación y a la fatiga, manteniendo al mismo tiempo cierta ductilidad. En el campo de los moldes

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de precisión, al utilizarse como insertos de acero inoxidable para moldes de estampación de carcasas de teléfonos móviles, las láminas de aleación de tungsteno con una dureza de 450 HV o superior pueden prolongar la vida útil del molde de 3 a 5 veces en comparación con el acero de alta velocidad tradicional. En los moldes de prensado en caliente de vidrio óptico, las láminas de aleación de tungsteno con una dureza superficial de 520 HV, combinadas con láminas de aleación de tungsteno nitruradas con implante iónico, pueden resistir eficazmente la adhesión al vidrio a alta temperatura y el desgaste abrasivo.

Además, en la relojería de alta gama, las láminas de aleación de tungsteno de alta dureza se procesan en rotores o microengranajes, aprovechando su alta densidad para aumentar la inercia y su alta dureza para garantizar la resistencia al desgaste durante el funcionamiento a largo plazo. En los últimos años, algunos fabricantes han utilizado un proceso compuesto de tratamiento térmico al vacío y criogénico profundo para crear un gradiente de dureza superficial en las láminas de aleación de tungsteno, equilibrando aún más la resistencia al desgaste superficial con la tenacidad del núcleo.

### 2.2.3 Láminas de aleación de tungsteno resistentes a la corrosión y al desgaste

Las láminas de aleación de tungsteno resistentes a la corrosión y al desgaste se desarrollan principalmente para entornos de trabajo como el procesamiento químico, marino y alimentario, donde entran en contacto con medios corrosivos o abrasivos. Su objetivo principal es prolongar la vida útil de los materiales en condiciones de erosión ácida, alcalina, salina y abrasiva.

La principal ruta de implementación incluye: seleccionar un sistema de fase aglutinante de cobre con alto contenido de níquel o níquel-cromo, aumentar el contenido de níquel a 8%–12% y el contenido de cromo a 2%–5% para formar capacidad de autopasivación; recubrir químicamente níquel-fósforo o níquel-boro en la superficie, o recubrir al vacío recubrimientos duros como CrN, TiAlN y DLC con un espesor de 10–50  $\mu\text{m}$ ; agregar trazas de elementos de tierras raras o boro y fósforo para promover la formación de una película de óxido protectora más densa en la fase aglutinante; y usar un proceso de sinterización de plasma de chispa + molienda de bolas de alta energía para obtener estructuras compuestas nanocristalinas o amorfas-nanocristalinas.

En aplicaciones como protectores de impulsores para bombas químicas, insertos para agitadores de grado alimentario y placas de válvulas para equipos de desalinización de agua de mar, las láminas de aleación de tungsteno con un recubrimiento superficial y sustrato de alto contenido de níquel presentan una excelente resistencia a la corrosión por picaduras y grietas. En entornos altamente abrasivos, como el revestimiento de tuberías de lodos y cribas de clasificación en equipos de procesamiento de minerales, la pérdida de peso de las láminas de aleación de tungsteno reforzadas por dispersión de TiC es de tan solo 1/5 a 1/8 de la de la fundición de alto contenido de cromo.

Cabe mencionar que algunas láminas de aleación de tungsteno resistentes a la corrosión y al desgaste también adoptan un diseño de estructura en gradiente: la capa superficial está enriquecida con fases aglutinantes con alto contenido de cromo-níquel y fases duras, mientras que el núcleo mantiene la proporción níquel-hierro tradicional, lo que garantiza la resistencia a la corrosión y al desgaste sin

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



sacrificar la tenacidad ni la maquinabilidad. Este diseño estructural representa la estrategia más reciente para láminas de aleación de tungsteno en entornos de servicio complejos.

## 2.3 Clasificación de láminas de aleación de tungsteno por tamaño y especificaciones

La clasificación de las láminas de aleación de tungsteno por tamaño es la forma más directa de comunicación entre fabricantes y usuarios finales. El espesor es el parámetro más crítico que determina la dificultad, el coste y la dirección de la aplicación del procesamiento. Si bien el ancho y la longitud también influyen, suelen poder ajustarse con flexibilidad mediante cizallamiento, corte por láser o corte por chorro de agua una vez determinado el espesor. Actualmente, la industria ha establecido clasificaciones de rangos de espesor relativamente unificadas, que reflejan los límites de las capacidades de procesamiento y se corresponden con diferentes escenarios de aplicación típicos.

### 2.3.1 Lámina de aleación de tungsteno ultrafina (espesor < 0,1 mm)

Las láminas ultrafinas de aleación de tungsteno suelen ser láminas con un espesor final de entre 0,005 mm y 0,099 mm, siendo las más delgadas inferiores a 0,008 mm. La preparación de estas láminas representa el más alto nivel de la tecnología de laminado de aleaciones de tungsteno, lo que exige estándares extremadamente altos de pureza de la materia prima, uniformidad de la palanquilla, precisión de laminación y un entorno limpio.

La producción de láminas ultrafinas generalmente utiliza sistemas de níquel-hierro o níquel-cobre con un contenido de tungsteno del 90%–95%, con una proporción ligeramente mayor de fase aglutinante para garantizar el rendimiento del trabajo en frío. El tocho debe preformarse primero en una placa de 2–5 mm de espesor mediante prensado isostático en caliente o laminado en caliente al vacío, seguido de múltiples pasadas de laminado en frío. La reducción en cada pasada se controla estrictamente al 5%–15%, y el rendimiento total del procesamiento a menudo supera el 95%. El recocido intermedio debe realizarse al alto vacío o en una atmósfera de hidrógeno de alta pureza para evitar la fractura frágil causada por inclusiones de oxidación. El acabado superficial de la lámina terminada puede alcanzar un Ra inferior a 0,05  $\mu\text{m}$ , y la tolerancia de espesor se controla dentro de  $\pm 0,003$  mm. Las láminas ultrafinas de aleación de tungsteno se utilizan principalmente en las hojas más delgadas de colimadores multilamina en equipos de radioterapia médica, cortinas flexibles de protección contra la radiación, películas amortiguadoras de vibraciones para instrumentos de precisión, rotores automáticos en relojes de alta gama y algunos sustratos electrónicos flexibles. En los últimos años, ante la demanda de materiales ultrafinos de alta densidad para dispositivos médicos portátiles y teléfonos con pantalla plegable, se han comenzado a combinar láminas ultrafinas de níquel-cobre con un espesor de 0,03–0,07 mm con polímeros para formar nuevas películas funcionales que combinan protección y flexibilidad.

### 2.3.2 Láminas de aleación de tungsteno de espesor convencional (0,1–10 mm)

El rango de espesor de 0,1 mm a 10 mm es actualmente el más amplio y utilizado, representando más del 90 % de la producción total de láminas de aleación de tungsteno. La tecnología de procesamiento

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

para este rango de espesor es muy avanzada, el costo es relativamente controlable y la precisión dimensional y la consistencia del rendimiento satisfacen los requisitos de la mayoría de las industrias.

Este rango de espesores abarca toda la cadena de proceso, desde el laminado en caliente hasta el acabado del laminado en frío. Tras múltiples pasadas de laminado en caliente a 1100–1300 °C, el espesor de la palanquilla se reduce a 3–8 mm y, posteriormente, se somete a laminado en frío y a múltiples procesos de recocido intermedio para obtener las especificaciones requeridas. La tolerancia de espesor se controla generalmente entre  $\pm 0,01$ – $\pm 0,05$  mm, y la superficie puede pulirse, lijarse o decaparse químicamente según sea necesario.

Las láminas de aleación de tungsteno de espesor estándar cubren prácticamente todas las aplicaciones principales: de 0,1 a 0,5 mm para álabes de colimadores y placas de protección; de 0,5 a 2 mm para contrapesos, amortiguadores de vibraciones y disipadores de calor; de 2 a 6 mm para insertos de molde y placas traseras de objetivo; y de 6 a 10 mm se utilizan principalmente como soportes estructurales o piezas prefabricadas. Esta diversidad de espesores también se refleja en los tratamientos superficiales, que permiten el niquelado, el oro, la plata, el recubrimiento DLC o el anodizado directo para formar capas decorativas de color, satisfaciendo diversas necesidades, desde funciones industriales hasta la estética de productos de consumo.

### 2.3.3 Lámina de aleación de tungsteno de paredes gruesas (espesor > 10 mm)

Las láminas de aleación de tungsteno con un espesor superior a 10 mm se denominan generalmente placas gruesas o láminas de pared gruesa, y su espesor máximo supera los 50 mm. Si bien estos productos representan un pequeño porcentaje de la producción total de láminas de aleación de tungsteno, su alto valor por lámina y la dificultad de procesamiento los convierten en una capacidad de producción clave que muchos fabricantes conservan.

Las chapas de paredes gruesas se producen principalmente mediante laminación en caliente, complementada con laminación en frío. Las palanquillas sinterizadas suelen tener diámetros de 300 a 500 mm. Las temperaturas de laminación en caliente se controlan a 1350–1450 °C, con una reducción del 20 % al 30 % por pasada hasta que el espesor alcanza los 12–15 mm, momento en el que se transfieren a laminación en caliente o en frío para su acabado. Para evitar grietas en los bordes, se emplean comúnmente técnicas de laminación de revestimiento o laminación con restricción lateral. La tolerancia de espesor del producto terminado suele ser de  $\pm 0,1$  a  $\pm 0,3$  mm, y la superficie requiere fresado o rectificado para eliminar la capa descarbonada y la cascarilla de óxido.

Las láminas de aleación de tungsteno de paredes gruesas se utilizan principalmente en bases de colimadores para grandes aceleradores lineales médicos, cuerpos de blindaje para detectores CT industriales, discos de equilibrio para grandes instrumentos inerciales, contrapesos para la perforación petrolera y absorbedores de calor en experimentos de física de altas energías. Debido a su gran tamaño y peso, su transporte y mecanizado suelen requerir herramientas especializadas. Por lo tanto, los usuarios finales suelen adoptar diseños con forma casi neta para minimizar el corte posterior.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 2.3.4 Láminas de aleación de tungsteno de tamaño personalizado

Las láminas de aleación de tungsteno a medida se refieren a diversas formas irregulares, láminas extra anchas, extra largas o láminas estructurales compuestas que superan los rectángulos y espesores estándar. Estos productos se fabrican íntegramente según los planos del cliente, lo que refleja la tendencia en la producción de láminas de aleación de tungsteno de pasar del "suministro estandarizado" al "suministro de soluciones".

Los tipos especiales comunes incluyen: láminas preformadas con escalones embutidos profundos, láminas perforadas con agujeros pasantes o avellanados, láminas ultra anchas con un ancho superior a 600 mm, tiras ultra largas con una longitud superior a 2 m, láminas funcionales con matrices de microestructura en la superficie y láminas laminadas directamente compuestas con cobre, aluminio, molibdeno, cerámica, etc. La producción a menudo requiere procesos especiales, como moldes especializados, corte por láser, fresado CNC, soldadura fuerte al vacío o encapsulación mediante prensado isostático en caliente (HIP).

Por ejemplo, algunos dispositivos médicos de alta gama requieren láminas de aleación de tungsteno con ranuras de cola de milano de 500 mm de ancho, 0,2 mm de espesor y una precisión de borde de 0,05 mm; algunos instrumentos ópticos aeroespaciales requieren láminas de aleación de tungsteno para amortiguar las vibraciones con superficies pulidas a espejo y curvas complejas. Si bien estos productos especializados tienen precios unitarios elevados, el costo total es menor porque reducen directamente los pasos de procesamiento secundario para los clientes.

## 2.4 Láminas de aleación de tungsteno según escenarios de aplicación

La clasificación de las láminas de aleación de tungsteno según sus escenarios de aplicación proporciona una visión más clara del valor real del material en diferentes industrias. Actualmente, las principales áreas de aplicación de las láminas de aleación de tungsteno han formado un patrón relativamente estable, abarcando la medicina, la fabricación industrial, la información electrónica y otros escenarios especializados.

### 2.4.1 Láminas de aleación de tungsteno para defensa nacional y uso militar

Las láminas de aleación de tungsteno se utilizan principalmente en las industrias de defensa y militar debido a su alta densidad, resistencia y buena tenacidad. Estas aplicaciones incluyen componentes que requieren masa concentrada, estabilidad estructural o funcionalidades específicas. El alto contenido de tungsteno de las láminas de aleación de tungsteno proporciona ventajas inerciales, mientras que la fase aglutinante optimiza la maquinabilidad, lo que facilita el conformado de precisión y el tratamiento de superficies.

Al equilibrar contrapesos, las láminas de aleación de tungsteno ajustan la distribución de masa para que el sistema funcione de forma estable, y su espesor uniforme garantiza la precisión. En aplicaciones

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estructurales de protección, las láminas de aleación de tungsteno aprovechan su capacidad de atenuación de la radiación para proporcionar un blindaje de capa fina altamente eficiente, mientras que los diseños compuestos mejoran la resistencia general. La estabilidad térmica de las láminas de aleación de tungsteno soporta entornos de alta temperatura, y el recubrimiento superficial mejora la resistencia a la corrosión.

Las aplicaciones priorizan la fiabilidad, siendo comunes los sistemas de tungsteno-níquel-hierro, lo que garantiza la estabilidad química para un servicio a largo plazo. El papel de las láminas de aleación de tungsteno en las industrias de defensa y militar ha facilitado la miniaturización de componentes, y la alta densidad reduce el volumen.

#### 2.4.2 Láminas de aleación de tungsteno para fabricación industrial

En la fabricación industrial, las láminas de aleación de tungsteno aprovechan sus ventajas combinadas de alta densidad y excelente resistencia al desgaste, lo que las hace ampliamente utilizadas en diversos componentes de equilibrado, componentes de amortiguación de vibraciones, revestimientos resistentes al desgaste y piezas de moldes. En instrumentos de precisión, contrapesos, contrapesos analíticos y componentes de navegación inercial, se suelen utilizar láminas de alta densidad a base de níquel-hierro para mejorar la estabilidad del equipo mediante un control preciso de la distribución de masa. Las placas de control de vibraciones en maquinaria rotatoria de alta velocidad aprovechan el alto módulo elástico y las características de amortiguación moderadas de las láminas de aleación de tungsteno para suprimir eficazmente la resonancia.

En la industria del molde, las láminas de aleación de tungsteno se procesan para fabricar insertos de matrices de estampación, núcleos de moldes de vidrio para prensado en caliente o casquillos de entrada de matrices de trefilado. Su alta dureza y resistencia al ablandamiento a alta temperatura prolongan significativamente la vida útil de los moldes. Los revestimientos, placas de válvulas y boquillas resistentes al desgaste en equipos petroleros y mineros también suelen utilizar láminas de aleación de tungsteno reforzadas con carburo para resistir los efectos de la erosión abrasiva y los medios corrosivos.

#### 2.4.3 Láminas de aleación de tungsteno para aplicaciones nucleares y médicas

En las industrias médica y nuclear, las láminas de aleación de tungsteno se utilizan principalmente para componentes de colimación y protección contra la radiación. Los colimadores multilamina en equipos de radioterapia suelen utilizar láminas de níquel-hierro o níquel-cobre con un espesor de 0,1 a 2 mm, lo que permite una conformación flexible del haz de radiación mediante la estratificación. En comparación con el plomo tradicional, las láminas de aleación de tungsteno son atóxicas, de alta resistencia y mantienen los bordes afilados con facilidad, lo que las convierte en la opción preferida actualmente. Los colimadores detectores en equipos de imagenología de medicina nuclear y las rejillas antidispersión PET/CT también utilizan ampliamente láminas de aleación de tungsteno para mejorar la resolución de las imágenes. En ensayos no destructivos industriales, como la detección de defectos por rayos X en piezas fundidas de gran tamaño y la inspección por rayos gamma de soldaduras de tuberías, también se requieren cajas de protección o ventanas de colimación fabricadas con láminas de aleación de tungsteno.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En la industria nuclear, ocasionalmente se utilizan placas de aleación de tungsteno más gruesas para el revestimiento de contenedores de protección contra la radiación y para el refuerzo local de tanques de almacenamiento de residuos, con el fin de lograr un blindaje eficiente en espacios reducidos. Con la creciente prevalencia de equipos de terapia de iones pesados y protones, la demanda de láminas de aleación de tungsteno ultradelgadas y altamente uniformes continúa creciendo.

#### 2.4.4 Láminas de aleación de tungsteno para aplicaciones de información electrónica

La demanda de láminas de aleación de tungsteno en la industria electrónica y de la información se concentra principalmente en tres áreas: gestión térmica, blindaje electromagnético y materiales para objetivos de pulverización catódica. Chips de alta potencia, amplificadores de potencia de estaciones base 5G, láseres y otros dispositivos suelen utilizar láminas de aleación de tungsteno a base de tungsteno-cobre o níquel-cobre como disipadores de calor o capas de extensión, aprovechando su coeficiente de expansión térmica similar al de los materiales semiconductores y su alta conductividad térmica para reducir eficazmente la temperatura de unión. Las láminas de aleación de tungsteno también se utilizan con frecuencia como placas posteriores para objetivos de pulverización catódica al vacío, unidas a objetivos de tungsteno puro o tungsteno-renio mediante soldadura fuerte o unión explosiva, lo que garantiza la resistencia de la unión y reduce el coste total.

En el campo de la compatibilidad electromagnética (CEM), las láminas de aleación de tungsteno no magnéticas se utilizan para fabricar cubiertas de blindaje, parches absorbentes o resortes de puesta a tierra para dispositivos sensibles a campos magnéticos, como teléfonos móviles, electrónica médica y aviónica. Algunos equipos de audio de alta gama utilizan láminas de aleación de tungsteno de alta densidad para crear anillos de peso en el diafragma del altavoz y mejorar la respuesta en bajas frecuencias. En los últimos años, con el rápido desarrollo de dispositivos semiconductores de tercera generación (nitruro de galio, carburo de silicio), la demanda de láminas de cobre-tungsteno más delgadas y con mayor conductividad térmica ha aumentado rápidamente, impulsando la optimización continua de los procesos relacionados.

#### 2.4.5 Otras láminas especiales de aleación de tungsteno

Además de las principales aplicaciones mencionadas, las láminas de aleación de tungsteno también desempeñan funciones únicas en algunos escenarios específicos. En la industria relojera de alta gama, se utilizan láminas de aleación de tungsteno pulidas para crear rotores automáticos, lo que aumenta la eficiencia del cuerda y proporciona una sensación de agarre firme. En el sector de los artículos deportivos, algunas cabezas de palos de golf incorporan láminas de aleación de tungsteno para ajustar el centro de gravedad y mejorar la estabilidad del golpe. En el sector de la joyería y las artes decorativas, las láminas de aleación de tungsteno chapadas en oro o negro se utilizan para cajas de relojes, correas interiores de anillos o cierres decorativos, y son cada vez más populares gracias a su superficie resistente a los arañazos y su brillo metálico único.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En la investigación científica, las láminas de aleación de tungsteno se utilizan a menudo para fabricar láminas de alta densidad para objetivos, portamuestras o revestimientos locales para cámaras de vacío, y se emplean en fuentes de radiación de sincrotrón y experimentos con aceleradores de partículas. En la restauración de arte y la preservación de reliquias culturales, las láminas de aleación de tungsteno también se emplean ocasionalmente para pesas de precisión o refuerzo estructural. Además, algunos campos interdisciplinarios emergentes, como las pesas para motores de vibración de dispositivos portátiles, las placas de equilibrio de cardán para drones y las pesas para ruedas de coches de carreras, están adoptando gradualmente las láminas de aleación de tungsteno para lograr una combinación de miniaturización y alto rendimiento.



CTIA GROUP LTD Láminas 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 tres: Principios de aleación y sistemas de composición de láminas de aleación de tungsteno

### 3.1 Principios químicos de la aleación de láminas de aleación de tungsteno

Las láminas de aleación de tungsteno implican esencialmente la introducción de pequeñas cantidades de otros metales o compuestos en el tungsteno para mejorar significativamente su plasticidad a temperatura ambiente, resistencia a altas temperaturas, resistencia a la oxidación y rendimiento de procesamiento, manteniendo al mismo tiempo la alta densidad inherente y el alto punto de fusión del tungsteno. El tungsteno en sí tiene una estructura cúbica centrada en el cuerpo y un gran radio atómico. El tungsteno puro casi no tiene sistemas de deslizamiento móviles a temperatura ambiente, y su temperatura de transición frágil es de hasta 300-400 °C o superior, lo que lo hace extremadamente propenso al agrietamiento durante el laminado a temperatura ambiente. A través de la aleación, la fase aglutinante compacta cúbica o hexagonal centrada en la cara introducida proporciona canales continuos de deformación plástica para las partículas de tungsteno. Simultáneamente, durante la sinterización y el trabajo en caliente, se producen una serie de procesos fisicoquímicos, que incluyen disolución-reprecipitación, humectación de la interfaz y regulación de la tensión de la interfase, formando finalmente una estructura compuesta típica de dos fases en la que las partículas de tungsteno están encapsuladas por la fase aglutinante. Esta estructura conserva la estructura dura del tungsteno al tiempo que logra una plasticidad macroscópica y una tenacidad que superan con creces las del tungsteno puro, creando las condiciones para una posterior gran deformación que lo lleva a laminarse en láminas delgadas.

#### 3.1.1 Análisis del diagrama de fases del tungsteno con otros elementos metálicos

El tungsteno es infinitamente miscible con la mayoría de los metales de transición en estado líquido, pero su solubilidad en estado sólido es extremadamente baja. Esto constituye el diagrama de fases básico característico de la aleación de láminas de aleaciones de tungsteno. El diagrama de fases binario W-Ni muestra que la solubilidad sólida del níquel en tungsteno no supera el 2% atómico a 1500 °C y es casi nula al enfriarse a temperatura ambiente. Mientras que la solubilidad del tungsteno en níquel es ligeramente superior, pero aún limitada. Los sistemas W-Fe, W-Cu, W-Co, W-Mo y otros también presentan características similares: a altas temperaturas existe una amplia región de fase líquida, lo que facilita la sinterización en fase líquida; a bajas temperaturas, se forman sistemas eutécticos o perieutécticos casi completamente inmiscibles. Es esta característica de "miscibilidad a alta temperatura y separación a baja temperatura" la que permite que las aleaciones de tungsteno logren la esferoidización y densificación de partículas de tungsteno a través del mecanismo de maduración de Ostwald durante la etapa de sinterización en fase líquida, mientras forman una estructura de dos fases con partículas de tungsteno claramente separadas y fase aglutinante después del enfriamiento en estado sólido.

Los sistemas W-Cu y W-Ag son más extremos; incluso en estado líquido, son solo parcialmente miscibles y no forman compuestos en absoluto en estado sólido, lo que los convierte en pseudoaleaciones típicas. W-Mo y W-Re, por otro lado, permiten que el molibdeno y el renio formen soluciones sólidas continuas con tungsteno. Esta característica se puede utilizar para ajustar el coeficiente de expansión térmica o

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aumentar la temperatura de recristalización reemplazando parcialmente el tungsteno con molibdeno o renio. El diagrama de fase ternario W-Ni-Fe es el más comúnmente utilizado en la producción real. Cerca de la temperatura de aparición de liquidus, hay una amplia región de dos fases de fase líquida + fase sólida de tungsteno. Cuando la relación níquel-hierro es de 7:3 a 8:2, la cantidad de fase líquida es moderada, suficiente para humedecer las partículas de tungsteno sin causar el colapso de la palanquilla. El análisis del diagrama de fase proporciona una base directa para el diseño de la composición: la cantidad total de fase aglutinante generalmente se controla del 3% al 10% en volumen; Un volumen demasiado bajo produce una humectación insuficiente y una densidad pobre, mientras que un volumen demasiado alto reduce significativamente la densidad y la dureza.

### 3.1.2 Mecanismos químicos del fortalecimiento por solución sólida y el fortalecimiento por dispersión

Las láminas de aleación de tungsteno provienen de la fase aglutinante. Elementos como el níquel, el hierro, el cobre y el cobalto son infinitamente miscibles en la fase  $\gamma$  cúbica centrada en las caras, formando soluciones sólidas sustitucionales. La disolución de tungsteno, molibdeno y renio de radios atómicos más grandes en la fase aglutinante a base de níquel causa distorsión reticular, lo que dificulta el movimiento de dislocación y, por lo tanto, aumenta el límite elástico de la propia fase aglutinante. La adición de cobalto es particularmente efectiva porque reduce la energía de falla de apilamiento, promueve el deslizamiento cruzado y el maclado, y mejora aún más la capacidad de endurecimiento por acritud. El hierro y el cobre, en cierta medida, reducen la energía de falla de apilamiento de la fase aglutinante, lo que facilita la coordinación de la deformación y mejora indirectamente la plasticidad general.

El fortalecimiento por dispersión es el mecanismo clave para que las láminas de aleación de tungsteno alcancen alta resistencia y rendimiento a altas temperaturas. Durante la sinterización, la solubilidad del tungsteno en la fase aglutinante disminuye drásticamente al disminuir la temperatura, lo que provoca que los átomos de tungsteno sobresaturados reprecipiten como partículas extremadamente finas durante la etapa de enfriamiento, fijándolos en la interfaz tungsteno-fase aglutinante y formando una capa de fortalecimiento de la interfaz. Simultáneamente, se añaden artificialmente partículas de segunda fase, como TiC, ZrC, El HfC y los óxidos de tierras raras no se disuelven durante la sinterización y se distribuyen uniformemente en la fase aglutinante o en la interfaz, lo que impide eficazmente la dislocación y la migración del límite de grano. En los últimos años, las láminas de aleación de tungsteno nanocristalino han controlado aún más el tamaño de partícula de tungsteno por debajo de los 100 nm, mejorando significativamente la resistencia mediante el uso de la relación Hall-Petch. La sinergia de estos dos mecanismos de refuerzo permite que las láminas de aleación de tungsteno mantengan altos niveles de resistencia incluso por encima de los 900 °C.

### 3.1.3 Condiciones de formación y estabilidad de las fases de aleación

Las principales fases de aleación en láminas de aleación de tungsteno incluyen la fase de solución sólida de tungsteno, la fase aglutinante  $\gamma$ - (Ni, Fe, Cu) y posibles fases de compuesto intermetálico u dispersión de óxido. La formación de la fase  $\gamma$  depende de la suficiente difusión y homogeneización de los elementos

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



aglutinantes durante la sinterización en fase líquida. La temperatura de sinterización debe ser aproximadamente 50–100 °C por encima del punto eutéctico más bajo y mantenerse a esa temperatura para permitir que las partículas de tungsteno se reorganicen y esferoidicen. Controlar las cantidades traza de vapor de agua en una atmósfera de hidrógeno afecta el contenido de oxígeno; un contenido demasiado alto conduce a la formación de  $\text{WO}_2(\text{OH})_2$  volátil, lo que resulta en pérdida de tungsteno, mientras que un contenido demasiado bajo resulta en una ventilación deficiente y poros cerrados.

La estabilidad a largo plazo de la fase aglutinante se controla principalmente por la energía interfacial y la diferencia de expansión térmica entre las fases de tungsteno y aglutinante. El ángulo de humectación en la interfaz entre el tungsteno y el níquel, el hierro y el cobre es cercano a 0° a la temperatura de sinterización en fase líquida. Tras el enfriamiento, la unión interfacial es principalmente metálica, lo que resulta en una alta resistencia. La tensión interfacial residual causada por la diferencia en los coeficientes de expansión térmica puede liberarse parcialmente durante el recocido, pero temperaturas excesivamente altas pueden inducir vacíos de Kirkendall o fases interfaciales frágiles (como  $\text{Ni}_4\text{W}$ ,  $\text{Fe}_7\text{W}_6$ ). La adición de trazas de tierras raras, boro y fósforo puede segregarse en la interfaz, formando películas delgadas amorfas o compuestas, lo que mejora aún más su estabilidad a alta temperatura. Al vacío o en atmósfera neutra, las láminas de aleación de tungsteno pueden utilizarse durante largos periodos por encima de los 1000 °C sin una transformación de fase significativa ni un engrosamiento de la microestructura. Mientras que al aire, se requiere un recubrimiento superficial para proteger la fase aglutinante e inhibir la oxidación preferencial.

### 3.2 El papel y la proporción de los elementos constituyentes en las láminas de aleación de tungsteno

La función y la proporción de los elementos constituyentes en las láminas de aleación de tungsteno son aspectos fundamentales del diseño de aleaciones. Mediante la selección y el control racionales de las proporciones de tungsteno, elementos aglutinantes y aditivos traza, es posible optimizar el rendimiento de procesamiento, el comportamiento mecánico y la adaptabilidad ambiental del material, manteniendo al mismo tiempo una alta densidad y un alto punto de fusión. El tungsteno, como elemento principal, proporciona la base de densidad del material y la estabilidad a alta temperatura, mientras que los elementos aglutinantes como el níquel, el hierro y el cobre son responsables de mejorar la fragilidad y promover la densificación. El diseño de dosificación se basa típicamente en el análisis del diagrama de fases, la cinética de sinterización y los experimentos de procesamiento termomecánico para garantizar que cada elemento ejerza plenamente sus efectos de humectación y difusión durante la etapa de sinterización en fase líquida y forme una estructura bifásica estable en estado sólido. Un contenido excesivo de tungsteno puede provocar una plasticidad insuficiente, mientras que un exceso de fase aglutinante reducirá la densidad general; por lo tanto, las proporciones deben ajustarse según el escenario de aplicación. Por ejemplo, en aplicaciones que requieren alta dureza, la proporción de tungsteno puede aumentarse adecuadamente, mientras que en sistemas donde la conductividad térmica es importante, el contenido de elementos como el cobre aumentará en consecuencia. La adición de oligoelementos refina aún más la microestructura, inhibe el crecimiento del grano o mejora la resistencia interfacial, pero sus proporciones deben controlarse estrictamente para evitar la introducción de fases perjudiciales. En general, la función de los elementos constituyentes se refleja en la sinergia multiescala: fortalecimiento

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la solución sólida a nivel atómico, regulación de la interfaz de fase a nivel micrométrico y equilibrio del rendimiento a nivel macro. Este principio de dosificación no solo es aplicable a los sistemas tradicionales de níquel-hierro y níquel-cobre, sino que también puede extenderse a los sistemas compuestos emergentes, lo que ayuda a los ingenieros de materiales a personalizar las composiciones de las aleaciones según las necesidades específicas.

En la formulación real, la pureza y la distribución del tamaño de partícula del polvo de tungsteno influyen significativamente en el rendimiento final. Un polvo fino de alta pureza favorece una distribución uniforme y reduce la porosidad, mientras que los elementos de la fase aglutinante suelen añadirse en forma de polvo metálico o polvo prealeado para garantizar una mezcla uniforme. La selección de la temperatura de sinterización está estrechamente relacionada con la formulación; una mayor proporción de fase aglutinante puede reducir la temperatura de sinterización, el consumo de energía e inhibir el engrosamiento de las partículas de tungsteno. La optimización de la formulación durante el tratamiento térmico implica el diseño del régimen de recocido, controlando la distribución de los elementos en la solución sólida mediante la regulación de la velocidad de enfriamiento para lograr un equilibrio entre resistencia y tenacidad. La formulación también debe tenerse en cuenta durante el tratamiento superficial; por ejemplo, ajustando la concentración de elementos superficiales antes del recubrimiento para mejorar la adhesión. La composición de las láminas de aleación de tungsteno también se ve afectada por la disponibilidad de recursos y los factores ambientales; parte del hierro o el cobre puede derivarse de materiales reciclados, pero las impurezas deben controlarse dentro de límites aceptables.

### 3.2.1 Mecanismo sinérgico de láminas de aleación de tungsteno en el sistema níquel-hierro

El mecanismo sinérgico del sistema níquel-hierro en las láminas de aleación de tungsteno se deriva principalmente del comportamiento complementario del níquel y el hierro en la fase aglutinante y su interacción interfacial con las partículas de tungsteno. En este sistema, el níquel, como principal elemento aglutinante, proporciona buena humectabilidad y ductilidad, mientras que la adición de hierro mejora el endurecimiento de la solución sólida y regula la estabilidad de la fase. Juntos, promueven el progreso fluido del proceso de sinterización en fase líquida. En las primeras etapas de la sinterización, el níquel y el hierro forman una fase líquida de bajo punto de fusión que encapsula rápidamente las partículas de tungsteno, logrando la reorganización de las partículas y la densificación inicial. La participación del hierro reduce la viscosidad de la fase líquida, aumenta la velocidad de difusión y facilita la disolución de los átomos de tungsteno en la fase aglutinante, precipitando partículas finas al enfriarse, lo que refuerza aún más la interfaz. El efecto sinérgico también se refleja en la evolución de la microestructura: la solución sólida de níquel-hierro presenta una estructura cúbica centrada en las caras, que puede absorber eficazmente la tensión de deformación y reducir el contacto directo entre las partículas de tungsteno, mejorando así la plasticidad general. Durante la etapa de trabajo en caliente, esta sinergia hace que el material sea menos propenso a la propagación de grietas durante el laminado y la microestructura recupera su uniformidad después del recocido.

Desde una perspectiva química, la diferencia en la estructura electrónica entre el níquel y el hierro conduce a una distorsión reticular en la solución sólida, lo que dificulta el movimiento de dislocación y

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aumenta la resistencia de la fase aglutinante. Simultáneamente, el ferromagnetismo del hierro afecta las propiedades electromagnéticas, pero no altera el dominio no magnético del sistema. En la interfaz, el níquel tiende a formar enlaces limpios, mientras que el hierro promueve la presencia estable de óxidos pequeños, mejorando conjuntamente la energía interfacial. Durante el enfriamiento, el efecto sinérgico de ambos inhibe el crecimiento anormal de partículas de tungsteno, manteniendo una morfología esférica fina, lo cual es beneficioso para el trabajo en frío posterior. Microscópicamente, este mecanismo implica un mecanismo de disolución-reprecipitación: a altas temperaturas, el tungsteno se disuelve parcialmente en la fase de níquel-hierro, y a bajas temperaturas, reprecipita y fija los límites de grano, mejorando la estabilidad a alta temperatura. Macroscópicamente, esto se manifiesta como el material que mantiene la estabilidad dimensional durante ciclos térmicos repetidos, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren resistencia a la fatiga térmica. El control proporcional es clave para la efectividad del mecanismo; La relación níquel-hierro suele ajustarse para equilibrar los efectos de humectación y fortalecimiento. Un contenido excesivo de hierro puede introducir una fase frágil, mientras que una cantidad adecuada optimiza la tenacidad.

Análisis posteriores revelan que el efecto sinérgico se extiende al comportamiento frente a la corrosión: el níquel constituye la base de la película de pasivación, mientras que el hierro contribuye a su distribución uniforme, mejorando así la resistencia a la corrosión en medios ácidos. En cuanto al rendimiento del procesamiento, el recocido entre pasadas aprovecha el efecto sinérgico de ambos para restaurar la microestructura y reducir la acumulación de tensiones residuales. En cuanto a la adaptabilidad ambiental, este sistema permite un ajuste preciso para afrontar diferentes condiciones de humedad o temperatura, garantizando así la fiabilidad del servicio a largo plazo. En resumen, el mecanismo sinérgico del sistema níquel-hierro encarna los principios de la ciencia de los materiales de complementariedad entre elementos e interacción multiescala, proporcionando una base sólida para las aplicaciones de ingeniería de láminas de aleaciones de tungsteno.

### 3.2.2 Mecanismo sinérgico del sistema níquel-cobre de láminas de aleación de tungsteno

El mecanismo sinérgico del sistema níquel-cobre en láminas de aleación de tungsteno se basa en la infinita miscibilidad del níquel y el cobre, y en su singular comportamiento químico interfacial con el tungsteno. En este sistema, el níquel proporciona resistencia de unión y humectabilidad, mientras que la adición de cobre mejora significativamente la conductividad térmica y eléctrica. Juntos, forman una fase aglutinante de solución sólida uniforme, que promueve la densificación y la optimización de la microestructura durante la sinterización. Durante la fase líquida, la fase líquida de níquel-cobre presenta baja tensión superficial, extendiéndose y cubriendo fácilmente las partículas de tungsteno para una reorganización eficiente. La participación del cobre aumenta la fluidez de la fase líquida, acelera la difusión y migración de átomos de tungsteno y forma una capa interfacial más fina durante la solidificación, reduciendo la porosidad residual. El efecto sinérgico se refleja en las propiedades termofísicas: la solución sólida de níquel-cobre combina la ductilidad del níquel y las características de difusión térmica del cobre, lo que proporciona al material una buena estabilidad ante choques térmicos. Durante el procesamiento, este mecanismo ayuda al material a coordinar la deformación durante el laminado en caliente y en frío, evitando la separación entre capas.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En términos de mecanismos químicos, los tamaños atómicos similares del níquel y el cobre garantizan una distribución desordenada en la solución sólida, lo que resulta en una ligera deformación reticular y una mayor resistencia de fase. Simultáneamente, la naturaleza no magnética del cobre evita que el sistema se magnetice en general, lo que lo hace adecuado para entornos electromagnéticamente sensibles. En las interacciones interfaciales, el níquel tiende a la unión química, mientras que el cobre facilita la adsorción física, formando juntos una interfaz de baja energía y mejorando la durabilidad de la unión. En cuanto a la evolución del enfriamiento, ambos trabajan sinérgicamente para suprimir la esferoidización desigual de las partículas de tungsteno, manteniendo la consistencia de la microestructura y facilitando la producción de láminas ultrafinas. A microescala, este mecanismo implica equilibrio termodinámico: los átomos de tungsteno se disuelven a altas temperaturas y precipitan a bajas temperaturas, formando partículas de refuerzo dispersas que mejoran la resistencia a la fluencia a alta temperatura. Macroscópicamente, el material mantiene una conductividad térmica uniforme en entornos con gradientes de temperatura, lo que lo hace adecuado para componentes de gestión térmica. En cuanto a la resistencia a la corrosión y a la intemperie, el níquel y el cobre promueven sinérgicamente la rápida formación de una película de pasivación superficial, mejorando la protección en condiciones de humedad o niebla salina. Durante la optimización del laminado, el recocido aprovecha las diferencias de difusión entre ambos para restaurar los defectos cristalinos y mejorar la calidad de la superficie. En condiciones ambientales, este sistema permite ajustar con precisión las proporciones para adaptarse a diferentes atmósferas de oxidación, garantizando cambios graduales y controlables en las propiedades del material durante la exposición prolongada.

### 3.2.3 Efecto dopante de los oligoelementos en láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno afectan principalmente la microestructura y las propiedades del material mediante la segregación de los límites de grano, la modificación de la interfaz de fases y la perturbación de la solución sólida. Este efecto es especialmente significativo en los sistemas tradicionales de níquel-hierro o níquel-cobre. La adición de trazas de tierras raras, boro, fósforo, cobalto, etc., puede refinar las partículas de tungsteno, mejorar la tenacidad de la fase aglutinante y mejorar la uniformidad general. Durante la sinterización, los dopantes tienden a acumularse en la fase líquida, lo que reduce la energía superficial, promueve la distribución uniforme de las partículas de tungsteno e inhibe el crecimiento. Tras el dopaje, la microestructura se vuelve más estable, con una porosidad reducida y una mayor densidad. Durante el trabajo en caliente, este efecto ayuda a reducir la formación de grietas, acelera la liberación de tensiones durante el recocido y mejora el rendimiento.

Desde el punto de vista mecanístico, el dopaje con tierras raras, como el lantano y el itrio, forma fases de óxido dispersas que fijan los límites de grano, dificultan la migración y aumentan la temperatura de recrystalización. El boro y el fósforo forman películas delgadas en las interfaces, ajustando los ángulos de humectación y mejorando la unión interfásica. El dopaje con cobalto refuerza la solución sólida aglutinante, aumenta la energía de falla de apilamiento y mejora la compatibilidad con la deformación. Microscópicamente, el dopaje provoca cambios localizados en la densidad electrónica, lo que afecta la cinética de difusión y precipita las fases finas a bajas temperaturas, lo que refuerza aún más el material.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Macroscópicamente, esto resulta en un equilibrio de propiedades mecánicas, con tenacidad a la fractura y dureza coordinadas, lo que lo hace adecuado para componentes de precisión.

En cuanto al comportamiento frente a la corrosión, los elementos dopantes favorecen la formación de películas de pasivación, mejorando así la resistencia a la erosión del medio. Durante el tratamiento superficial, el dopaje mejora la adhesión del recubrimiento y prolonga su vida útil. En la adaptación ambiental, este efecto permite ajustes específicos para afrontar diferentes condiciones de temperatura o humedad. En resumen, el efecto dopante de los oligoelementos encarna el principio material de que pequeñas adiciones tienen un impacto significativo, lo que proporciona un enfoque eficaz para optimizar el rendimiento de las láminas de aleación de tungsteno. La verificación experimental demuestra que este efecto puede orientar las estrategias de dopaje emergentes e impulsar el progreso continuo en la ciencia de los materiales.

### 3.3 Principios químicos del diseño de la composición de láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno se basan principalmente en el equilibrio de fases, la cinética de difusión y el comportamiento químico interfacial. Estos principios guían todo el proceso, desde la preparación de la materia prima hasta el tratamiento térmico final, garantizando la estabilidad y repetibilidad de las propiedades del material. La clave del diseño de la composición reside en controlar la proporción de tungsteno con respecto a los elementos de la fase aglutinante. El análisis del diagrama de fases se utiliza para predecir las posibles estructuras de las fases y evitar la formación de fases perjudiciales. Por ejemplo, en el sistema tungsteno-níquel-hierro, los principios químicos priorizan el equilibrio de la proporción níquel-hierro para mantener la humectabilidad durante la sinterización en fase líquida y la estabilidad de la solución sólida tras el enfriamiento. Los principios de difusión requieren considerar las tasas de migración de los elementos a altas temperaturas. Los átomos de tungsteno se difunden más lentamente que los de níquel o cobre; por lo tanto, el diseño requiere prolongar el tiempo de retención para promover una distribución uniforme. Los principios químicos interfaciales se refieren a la energía de enlace entre las partículas de tungsteno y la fase aglutinante. Con frecuencia se introducen oligoelementos en el diseño para ajustar la tensión superficial y mejorar la resistencia de la unión interfacial.

En el diseño práctico, los principios químicos también incluyen la consideración del equilibrio redox. El punto de rocío de hidrógeno de la atmósfera de sinterización debe coincidir con la composición para inhibir la oxidación del tungsteno y promover la reducción de la fase aglutinante. Durante la formulación, un mayor contenido de tungsteno requiere un aumento de la fase aglutinante para compensar la pérdida de plasticidad, mientras que un exceso de fase aglutinante requiere ajustes para mantener la densidad. El proceso de tratamiento térmico sigue los principios de transformación de fases, controlando la velocidad de enfriamiento para regular el tamaño y la distribución de las fases precipitadas y optimizar las propiedades mecánicas. Los principios químicos de superficie se reflejan en el diseño del recubrimiento; la composición debe ser compatible con la solución de recubrimiento para evitar problemas de adhesión causados por la segregación de elementos. Por consideraciones ambientales, los principios guían el uso de elementos reciclados, pero el contenido de impurezas como el oxígeno y el carbono debe controlarse para evitar la introducción de fases frágiles.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.3.1 Lógica de optimización de la composición orientada al rendimiento para láminas de aleación de tungsteno

La lógica de optimización de la composición orientada al rendimiento para láminas de aleación de tungsteno comienza con los requisitos de la aplicación final y trabaja en sentido inverso para deducir las proporciones de los elementos y el orden de adición, garantizando así un equilibrio coordinado de propiedades como densidad, dureza, conductividad térmica y ductilidad. Esta lógica identifica primero las propiedades clave; por ejemplo, al buscar una alta densidad, prioriza el aumento de la proporción de tungsteno mientras se ajusta la fase aglutinante para mantener la procesabilidad. El proceso de optimización implica múltiples iteraciones: la proporción inicial se estima con base en el diagrama de fases para determinar el contenido de la fase líquida, y se realizan ajustes tras la verificación experimental para que coincida con la tasa de contracción de sinterización. La lógica enfatiza la sinergia entre los elementos; por ejemplo, el níquel proporciona ductilidad, mientras que el hierro o el cobre complementan el refuerzo o la conductividad térmica, y la optimización de su proporción puede mejorar la estabilidad térmica. El microdopaje sirve como método de ajuste fino; las tierras raras refinan la microestructura, y el boro y el fósforo ajustan la interfaz para mejorar la resistencia a la corrosión.

La lógica también incluye consideraciones sobre las compensaciones de rendimiento. Para una alta dureza, se aumenta el contenido de tungsteno y se añaden carburos, pero es necesario monitorizar la disminución de la tenacidad y restablecer el equilibrio mediante la optimización del recocido. Para la conductividad térmica, se aumenta la proporción de cobre, pero esta debe evitar un exceso de fase líquida que genere una microestructura porosa. En la optimización, las herramientas de simulación química ayudan a predecir las rutas de formación de fases, lo que ayuda a reducir los ciclos experimentales. La retroalimentación del procesamiento termomecánico se incorpora a la lógica; el análisis de defectos de laminación guía el ajuste fino de la composición, como la adición de cobalto para mejorar la coordinación de la deformación. Para el rendimiento ambiental, la optimización se centra en la formación de fases resistentes a la corrosión, y la proporción de adición de cromo o molibdeno se ajusta según el tipo de medio. La lógica general forma un circuito cerrado: definición de requisitos, diseño de proporciones, verificación de la preparación, pruebas de rendimiento y ajuste iterativo, lo que garantiza una estrecha correlación entre la composición y el rendimiento. Gracias a esta lógica, las láminas de aleación de tungsteno pueden adaptarse a diversos requisitos en campos como la instrumentación de precisión y la gestión térmica, lo que demuestra la orientación práctica del diseño de materiales.

### 3.3.2 Métodos de control químico para la uniformidad de la composición de láminas de aleación de tungsteno

El control químico de la uniformidad compositiva de las láminas de aleación de tungsteno se logra principalmente mediante la mezcla de polvos, el ajuste de los parámetros de sinterización y la difusión del tratamiento térmico. Estos métodos garantizan el control de calidad en cada etapa, desde la fuente hasta el producto terminado, evitando fluctuaciones en el rendimiento causadas por la segregación y la falta de homogeneidad. En la etapa de mezcla de polvos, los métodos incluyen aleación mecánica o secado por aspersión para asegurar la distribución uniforme de elementos como tungsteno, níquel y hierro

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a escala micrométrica. Los aditivos químicos, como los surfactantes, ayudan en la dispersión del polvo. En el control de la sinterización, la regulación de la cantidad de fase líquida es crucial. El diseño del gradiente de temperatura promueve una humectación uniforme, y el flujo de hidrógeno elimina las impurezas volátiles, reduciendo el enriquecimiento local. El ajuste de la velocidad de enfriamiento suprime la difusión desigual de elementos, y el enfriamiento rápido mantiene un estado uniforme.

Los métodos de tratamiento térmico incluyen el recocido al vacío para promover la difusión a nivel atómico, eliminar los gradientes de concentración y homogeneizar aún más el material mediante múltiples ciclos de recocido. Los métodos químicos de superficie, como la implantación iónica o la deposición química de vapor, introducen una capa uniforme sobre la superficie de la lámina, mejorando la consistencia general. En el control de calidad, la retroalimentación del análisis químico guía la iteración del método; por ejemplo, ajustando las proporciones tras detectar áreas de segregación mediante espectroscopia. Los métodos ecológicos utilizan polvos prealeados para reducir el riesgo de mezclas desiguales.

### 3.3.3 Influencia de los elementos de impureza en el rendimiento de las láminas de aleación de tungsteno

Las impurezas en las láminas de aleación de tungsteno provienen principalmente del polvo de tungsteno crudo, el polvo de la fase aglutinante, los gases introducidos durante el procesamiento y los residuos de los equipos. Incluso niveles extremadamente bajos pueden afectar significativamente la microestructura, el comportamiento mecánico y la adaptabilidad ambiental. Las impurezas comunes incluyen oxígeno, carbono, nitrógeno, fósforo, azufre, silicio, potasio, sodio y calcio, siendo el oxígeno y el carbono los que tienen un impacto más extendido.

Cuando el oxígeno existe en forma libre u óxido, forma fácilmente una película delgada de óxido en la superficie de las partículas de tungsteno, reduciendo la humectabilidad durante la sinterización en fase líquida, debilitando la unión interfacial y causando microporos o inclusiones localizadas. Esto, a su vez, reduce la tenacidad a la fractura y aumenta la tendencia al agrietamiento por laminación. El oxígeno también reacciona con el tungsteno a altas temperaturas para formar óxidos volátiles, haciendo rugosa la superficie de las partículas de tungsteno, dificultando la reorganización de las partículas y afectando la densidad final. La presencia de carbono es más compleja: trazas de carbono pueden formar carburos finos con el tungsteno, proporcionando cierto fortalecimiento por dispersión, pero el carbono excesivo se segregará en los límites de grano o interfaces, formando WC o  $W_2C$  frágiles, debilitando significativamente la resistencia interfacial y aumentando la tendencia a la fractura intergranular bajo tensión. El nitrógeno generalmente se reduce y se elimina en atmósferas de hidrógeno a alta temperatura, pero el nitrógeno residual formará fases aciculares de nitruro con el tungsteno, convirtiéndose también en sitios de iniciación de grietas. Incluso trazas de elementos como el fósforo y el azufre se acumulan fácilmente en la fase aglutinante o en la interfaz, formando compuestos de bajo punto de fusión, reduciendo la resistencia a altas temperaturas e induciendo fragilización en caliente. Los metales alcalinos como el potasio y el sodio, así como el calcio y el silicio, se originan principalmente a partir de residuos del proceso de tungstato para la preparación del polvo de tungsteno. Se volatilizan o forman

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

poros durante la sinterización, alterando la continuidad de la estructura y causando burbujas o delaminación en casos graves.

Las impurezas también tienen un efecto sinérgico en el rendimiento. Por ejemplo, la coexistencia de oxígeno y fósforo facilita la formación de una fase de vidrio de fosfato, que encapsula las partículas de tungsteno, dificulta el proceso de disolución-reprecipitación y provoca formas irregulares en las partículas de tungsteno, reduciendo su esfericidad. Durante el servicio a alta temperatura, las zonas con impurezas a menudo se convierten en sitios preferenciales para la oxidación o la corrosión, acelerando el fallo del material. En la producción de láminas ultrafinas, los defectos diminutos causados por impurezas pueden amplificarse, convirtiéndose en el punto de partida de grietas en los bordes o defectos superficiales tipo cáscara de naranja. Por lo tanto, la producción moderna de láminas de aleación de tungsteno exige cada vez más pureza de la materia prima y limpieza del proceso, y el control de impurezas se ha convertido en uno de los factores clave que determinan si un material puede entrar en aplicaciones de alta gama.

### 3.3.4 Métodos para eliminar elementos de impureza de láminas de aleación de tungsteno

de láminas de aleación de tungsteno se lleva a cabo a lo largo de toda la cadena de producción, desde la preparación de la materia prima hasta el tratamiento térmico del producto terminado. Adopta diversos métodos, como la purificación química, el refinado físico, la purificación atmosférica y el postratamiento, para conformar un sistema de purificación multietapa.

El proceso de eliminación en la etapa de materia prima es de suma importancia. El polvo de tungsteno generalmente utiliza tungstato de amonio de alta pureza como precursor, y mediante múltiples procesos de recristalización y reducción profunda de hidrógeno, impurezas como oxígeno, metales alcalinos y fósforo se reducen a niveles bajos. Los polvos de níquel, hierro y cobre en fase aglutinante se preparan mediante métodos carbonílicos o electrolíticos, seguidos de desgasificación al vacío para reducir aún más el contenido de carbono, oxígeno y azufre. Antes de su mezcla, el polvo de tungsteno suele someterse a un tratamiento secundario de purificación de hidrógeno a alta temperatura, que utiliza la reacción de reducción del hidrógeno con óxidos para generar vapor de agua, que posteriormente se descarga, eliminando simultáneamente impurezas volátiles residuales como potasio y sodio.

La etapa de sinterización es crucial para la eliminación de impurezas gaseosas y volátiles. Una atmósfera húmeda de hidrógeno (con un punto de rocío estrictamente controlado) reduce eficazmente los óxidos en la superficie de las partículas de tungsteno y expulsa el vapor de agua del horno. La sinterización con hidrógeno seco o a alto vacío se utiliza para eliminar el nitrógeno y los hidrocarburos residuales. Para evitar la recondensación de impurezas de bajo punto de fusión, como el fósforo y el azufre, tras la volatilización, se suele emplear un proceso de calentamiento por etapas: primero se completa la desgasificación a una temperatura más baja y luego se eleva rápidamente la temperatura hasta la temperatura de sinterización en fase líquida. La almohadilla aislante entre la carga del horno y la palanquilla debe ser de grafito o alúmina de alta pureza para evitar la contaminación secundaria.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



La eliminación durante el trabajo en caliente y el tratamiento térmico se basa principalmente en alto vacío o hidrógeno de alta pureza. El precalentamiento previo al laminado en caliente o en tibio se realiza en un horno de vacío para volatilizar aún más los metales alcalinos residuales. Tras el laminado en frío, también se realizan múltiples recocidos intermedios en alto vacío, lo que permite la salida de los gases residuales por difusión. En la producción de láminas ultrafinas, se suele añadir un proceso específico de recocido de desgasificación al vacío para garantizar la ausencia de microporos en la dirección del espesor.

La eliminación posterior al tratamiento se centra en las impurezas superficiales o cercanas a la superficie. El decapado químico puede disolver selectivamente las capas ricas en oxígeno y fósforo de la superficie; el electropulido o la limpieza con plasma pueden eliminar eficazmente la materia orgánica y los iones metálicos adsorbidos; el tratamiento térmico al vacío con captadores de titanio puede capturar en profundidad el oxígeno y el nitrógeno residuales. Algunas chapas de alta gama también utilizan el refinado por fusión por zonas o la fusión por haz de electrones para la purificación final del tocho.

En resumen, la eliminación de impurezas en láminas de aleación de tungsteno sigue una estrategia de tres niveles: control en origen, eliminación del proceso y refinación del producto terminado. Gracias al efecto sinérgico de múltiples métodos, el contenido de oxígeno se puede controlar de forma estable dentro de un rango extremadamente bajo, a la vez que se reducen significativamente otras impurezas nocivas, sentando así las bases para la alta fiabilidad y larga vida útil del material.



CTIA GROUP LTD Láminas de aleación de tungsteno

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Capítulo 4 La relación entre la estructura y las propiedades de las láminas de aleación de tungsteno

### 4.1 Microestructura de la lámina de aleación de tungsteno

La microestructura de [las láminas de aleación de tungsteno](#) suele presentar una composición bifásica, con partículas de tungsteno como fase dura, encapsuladas por fases aglutinantes a base de níquel o cobre, formando una microestructura similar al cermet. Esta estructura se origina en la pulvimetalurgia y evoluciona tras la sinterización mediante procesamiento termomecánico. Las partículas de tungsteno son mayoritariamente casi esféricas o poliédricas, y su distribución de tamaño afecta a la uniformidad estructural. La fase aglutinante rellena los huecos entre partículas, creando canales de deformación continuos. Defectos como la porosidad y las dislocaciones son inevitables en la estructura, pero pueden minimizarse mediante el control del proceso. La microestructura también incluye capas de interfaz, donde las zonas de transición formadas por la difusión de elementos mejoran la unión interfásica. Métodos de observación como la microscopía electrónica de barrido (MEB) y la microscopía electrónica de transmisión (MET) revelan detalles estructurales, lo que facilita el análisis del origen de las propiedades. La evolución estructural varía según las etapas del procesamiento; las partículas se esferoidizan durante la sinterización y se vuelven fibrosas durante el laminado.

#### 4.1.1 Estructura del grano y composición química del límite de grano

tungsteno se componen principalmente de cristales cúbicos centrados en el cuerpo (BCC) de la fase de tungsteno y cristales cúbicos centrados en las caras (FCC) de la fase aglutinante. Los primeros ocupan la mayor parte del volumen, proporcionando la base para una alta dureza y densidad, mientras que los segundos actúan como una matriz continua, mejorando la plasticidad general. Durante la sinterización, los granos de tungsteno se esferoidizan gradualmente mediante un mecanismo de disolución-reprecipitación. Inicialmente, las partículas poligonales tienden a presentar una curvatura superficial uniforme bajo la influencia de la fase líquida, formando finalmente agregados de tamaño relativamente uniforme. Esta evolución estructural se ve influenciada por la mojabilidad de la fase aglutinante; una buena mojabilidad promueve la reorganización de las partículas, reduce los ángulos de contacto y forma límites de grano de baja energía. El tamaño de grano suele estar controlado por el tamaño de partícula del polvo y la temperatura de sinterización. Un polvo fino y un tiempo de retención prolongado son beneficiosos para las estructuras de grano pequeño, mejorando la resistencia pero reduciendo potencialmente la ductilidad. El laminado introduce la recristalización inducida por deformación, alargando los granos a lo largo de la dirección del laminado y formando texturas fibrosas, optimizando aún más las propiedades anisotrópicas.

La composición química del límite de grano desempeña un papel crucial en las láminas de aleación de tungsteno, principalmente en la distribución elemental en la interfaz tungsteno-fase aglutinante. Esta interfaz suele acumular pequeñas cantidades de átomos de tungsteno, que precipitan de la fase aglutinante y forman una delgada región de solución sólida que mejora la resistencia de la unión. En los sistemas de níquel-hierro, el hierro tiende a segregarse en los límites de grano, regulando la densidad electrónica e

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

influyendo en las trayectorias de movimiento de las dislocaciones. Los sistemas de cobre presentan una distribución uniforme del cobre en la interfaz, lo que promueve la continuidad de los canales de conductividad térmica. Las impurezas traza, como el oxígeno y el fósforo, se acumulan en los límites de grano, formando potencialmente películas compuestas que alteran las energías límite; estas deben controlarse mediante procesos de purificación para evitar la fragilización. El análisis de la composición química suele utilizar espectroscopia de energía dispersiva (EDS) o microanálisis de sonda atómica para revelar cambios de gradiente en la interfaz. Este gradiente ayuda a amortiguar la tensión y a reducir la propagación de grietas.

Además, la estabilidad de la estructura del grano está estrechamente relacionada con la composición del límite de grano. La sinterización al alto vacío puede suprimir la formación de óxidos de oxígeno en la interfaz, mantenerla limpia y mejorar la fiabilidad del servicio a alta temperatura. El recocido ajusta la composición mediante difusión, diluye los elementos segregantes y restablece el equilibrio estructural. Los tipos de límite de grano son diversos; los de ángulo grande facilitan la migración de elementos, mientras que los de ángulo pequeño son más estables. Los parámetros de procesamiento, como la reducción, afectan la densidad del límite; los de alta densidad pueden fijar dislocaciones y aumentar la dureza. Al exponerse al ambiente, la composición del límite de grano determina la trayectoria de corrosión, y el enriquecimiento de elementos pasivantes puede formar una película protectora.

#### 4.1.2 Distribución y estado químico de las fases de aleación

Las fases de aleación en láminas de aleación de tungsteno incluyen principalmente fases de solución sólida de tungsteno y soluciones sólidas aglutinantes. La primera consiste en elementos de aleación con disolución limitada dentro de los granos de tungsteno, mientras que la segunda consiste en átomos de tungsteno disueltos en una matriz a base de níquel o cobre. En términos de distribución, la fase de tungsteno está uniformemente incrustada en la fase aglutinante como partículas discretas, formando una red compuesta. El espaciamiento de partículas está determinado por la relación de volumen de la fase aglutinante; un espaciamiento menor es beneficioso para una transferencia de tensión uniforme. Químicamente, la fase de tungsteno mantiene un estado de alta pureza, y puede existir una delgada zona de transición de óxido o solución sólida en la superficie. La fase aglutinante tiene un estado químico más complejo. En el sistema níquel-hierro, es una solución sólida de fase  $\gamma$ , donde los átomos de hierro reemplazan algunas posiciones de níquel, formando una disposición desordenada. Este estado es estable, pero una fase ordenada puede precipitar con los cambios de temperatura. El sistema de cobre es similar; el cobre y el níquel son infinitamente miscibles, lo que garantiza un estado uniforme y sin tendencia a la separación de fases.

La optimización de la distribución de fases depende de la cinética de sinterización. La reorganización de partículas en la fase líquida produce una distribución más aleatoria, lo que previene la aglomeración. El tratamiento térmico homogeneiza aún más la distribución; el ajuste del límite de partículas impulsado por la difusión reduce las diferencias de densidad local. El estado químico se ve afectado por la velocidad de enfriamiento; el enfriamiento rápido bloquea un estado sobresaturado, mientras que el enfriamiento lento promueve la precipitación, formando fases finas de refuerzo. El estado químico en la interfaz es

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

único, con regiones de gradiente elemental presentes; el tungsteno pasa gradualmente de partículas a la fase aglutinante, lo que mejora la compatibilidad. Las técnicas de observación como la difracción de rayos X confirman el estado, sin mostrar picos de compuestos dañinos. La distribución desigual puede producir gradientes de rendimiento, lo que requiere un control inicial de la homogeneidad mediante agitación y mezcla. Durante el recocido, la evolución del estado incluye la recrystalización, lo que reduce los defectos cristalinos y mejora la conductividad.

Además, la interacción entre la distribución de fases y el estado influye en el comportamiento ambiental. Una fase aglutinante uniformemente distribuida proporciona protección continua, mientras que un estado químicamente estable resiste la oxidación. Durante el procesamiento, el laminado y el estiramiento distribuyen la fase, formando una estructura orientada. El estado se mantiene, pero la deformación induce la acumulación de dislocaciones.

#### 4.1.3 Análisis del origen químico de las estructuras defectuosas

de tungsteno incluyen principalmente defectos puntuales, defectos lineales, defectos superficiales y defectos de volumen. Sus orígenes químicos provienen de la difusión desigual de elementos, reacciones en la interfase y la introducción de impurezas. Los defectos puntuales, como las vacantes y los átomos intersticiales, a menudo se generan por la disolución y precipitación de átomos de tungsteno en la fase aglutinante durante la sinterización; el tungsteno sobresaturado conduce a una mayor concentración de vacantes. Los defectos lineales, es decir, las dislocaciones, están relacionados con la deformación por laminación; el fortalecimiento de la solución sólida en la fase aglutinante aumenta la densidad de dislocaciones y, químicamente, los átomos de hierro o cobre fijan las dislocaciones, lo que afecta su movimiento. Los defectos superficiales, como los límites de grano y los límites de fase, son causados químicamente por la segregación de impurezas; el oxígeno y el fósforo se acumulan en la interfase para formar compuestos, alterando sus estados energéticos. Los defectos de volumen, como la porosidad y las inclusiones, son causados por una sinterización incompleta, resultante de gases residuales u óxidos no eliminados. El análisis reveló que la formación de defectos también se ve impulsada por la termodinámica: la difusión a alta temperatura promueve la migración de vacantes, mientras que la congelación a baja temperatura forma cúmulos. Las impurezas tienen un efecto químico significativo, ya que el carbono y el nitrógeno forman compuestos intersticiales que aumentan el volumen del defecto. El recocido reduce los defectos, repara las vacantes mediante difusión y redistribuye las impurezas en condiciones de equilibrio químico. Los defectos de interfaz tienen causas únicas: las diferencias de expansión térmica inducen microfisuras y los gradientes elementales alivian la tensión. Los métodos de observación, como la microscopía electrónica, revelan las causas, mientras que la espectroscopia de rayos X por dispersión de energía muestra correlaciones de impurezas. Es necesario controlar el impacto de los defectos en el rendimiento; la purificación química reduce la intensidad de su formación.

#### 4.2 Propiedades y mecanismos de las láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno se deben principalmente al diseño único de su estructura compuesta. La interacción entre la fase de tungsteno y la fase aglutinante logra diversos aspectos como la densidad, la conductividad

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



térmica y la estabilidad térmica. El mecanismo de rendimiento involucra procesos químicos como el empaquetamiento a nivel atómico, el transporte de electrones y el soporte de la interfase. Por ejemplo, la alta densidad se origina de la disposición cercana de los átomos de tungsteno, mientras que la conductividad térmica y eléctrica dependen de las rutas de migración de los electrones libres. El mecanismo de estabilidad térmica se basa en el equilibrio termodinámico de la estructura de la fase, donde la unión interfacial inhibe la deformación a alta temperatura. El análisis mecanicista ayuda a comprender el origen del rendimiento, por ejemplo, cómo el proceso de laminación afecta la dispersión de electrones, regulando así la conductividad. Bajo factores ambientales, el mecanismo también incluye el comportamiento de oxidación, donde el estado químico de la superficie afecta la estabilidad.

#### 4.2.1 El principio del empaquetamiento de átomos químicos de alta densidad en láminas de aleación de tungsteno

El principio de empaquetamiento atómico químico de alta densidad de las láminas de aleación de tungsteno se basa principalmente en la alta masa atómica de los átomos de tungsteno y la disposición compacta de su estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo. Esta estructura permite que los átomos llenen eficientemente un espacio limitado, y el proceso de aleación optimiza aún más el método de empaquetamiento. A través de la pulvimetalurgia, el polvo de tungsteno experimenta una reorganización de partículas durante la sinterización, y el aglutinante en fase líquida promueve la proximidad de los átomos de tungsteno, formando una red densa. El principio del empaquetamiento atómico implica la sinergia de las fuerzas de van der Waals y los enlaces metálicos. Los átomos de tungsteno tienen un radio relativamente grande pero una constante reticular moderada, lo que garantiza espacios interatómicos mínimos dentro de la unidad cúbica centrada en el cuerpo. La adición de elementos de aleación como el níquel y el hierro no cambia directamente el empaquetamiento de la fase de tungsteno, pero ajusta el volumen general a través de la formación de una solución sólida, lo que reduce los defectos de vacantes.

El principio de apilamiento también se refleja en la interacción interfásica. Los átomos de la fase aglutinante rellenan los huecos entre las partículas de tungsteno, de forma similar a como un líquido humedece una superficie sólida, y el enlace químico mejora la resistencia de la conexión. En la cinética de sinterización, la energía superficial impulsa la migración atómica, y los átomos superficiales de tungsteno se difunden en las zonas cóncavas, logrando un apilamiento uniforme. Durante el enfriamiento, la contracción térmica comprime aún más el espacio interatómico, y las fases precipitadas en equilibrio químico ayudan a fijar la estructura. Microscópicamente, este principio se manifiesta como el orden de la red de tungsteno; la solución sólida sustitutiva restringe la expansión de la red, manteniendo un alto factor de relleno. En el rendimiento macroscópico, la alta densidad se debe a esta compacidad atómica, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren una masa concentrada.

Análisis posteriores revelan que el principio de empaquetamiento está influenciado por la electronegatividad de los elementos. La diferencia de electronegatividad entre el tungsteno y los elementos de la fase aglutinante promueve la compartición de electrones, formando una red de enlaces estable. El empaquetamiento atómico único en la interfaz, con su región de gradiente, permite que los átomos de tungsteno se integren gradualmente en la fase aglutinante, mejorando la coherencia general.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los parámetros del proceso, como los gradientes de temperatura, controlan el proceso de empaquetamiento, mientras que las altas temperaturas extienden el tiempo de difusión y optimizan la uniformidad del llenado. Los elementos de impureza interfieren; los compuestos formados por oxígeno y otros elementos ocupan espacio y deben eliminarse utilizando una atmósfera reductora. El recocido restaura el orden de empaquetamiento y la difusión repara los huecos. En la adaptación ambiental, este principio garantiza una densidad relativamente estable bajo cambios de temperatura, lo que respalda el uso a largo plazo.

#### 4.2.2 Mecanismo de transporte químico para la conductividad térmica y eléctrica de láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno se basan principalmente en el transporte de electrones libres y fonones. La fase de tungsteno proporciona una alta densidad electrónica, mientras que la fase aglutinante optimiza la ruta de transporte, formando un sistema de portadores compuesto. El mecanismo de conductividad implica compartir electrones dentro de los enlaces metálicos; los electrones externos de los átomos de tungsteno se desprenden fácilmente, formando un gas de electrones, y la introducción de átomos de níquel o cobre a través de la aleación aumenta la concentración de portadores. La conductividad térmica se logra mediante vibraciones de fonones, con vibraciones reticulares que se propagan eficientemente en la fase de tungsteno y la fase aglutinante amortigua la dispersión. La base química de este mecanismo reside en la configuración electrónica de valencia; la capa de electrones d del tungsteno se hibrida con los electrones sp de la fase aglutinante, mejorando la movilidad de los portadores.

El mecanismo de los portadores también se refleja en la distribución de fases; la fase enlazada continua forma una red conductora, lo que reduce la resistencia interfacial, y la estabilidad química garantiza un flujo de electrones sin obstáculos. El proceso de sinterización optimiza el mecanismo, ya que la fase líquida promueve una interfaz limpia y reduce la barrera de potencial. Si bien los precipitados enfriados pueden dispersar los portadores, un refuerzo adecuado mejora la conductividad térmica. Microscópicamente, el mecanismo implica la forma de la superficie de Fermi; los elementos de aleación ajustan la estructura electrónica, lo que afecta la masa efectiva de los portadores. En términos macroscópicos, este mecanismo facilita la gestión térmica y las aplicaciones electrónicas, logrando un equilibrio entre la conductividad térmica y eléctrica.

Además, el mecanismo se ve influenciado por la química de los defectos, ya que las dislocaciones o vacantes dispersan los portadores, lo cual debe reducirse mediante recocido. Elementos de impurezas como el oxígeno forman trampas que capturan electrones y reducen la conductividad; los procesos de purificación mitigan este efecto. En dependencia de la temperatura, el mecanismo muestra acoplamiento electrón-fonón; las altas temperaturas aumentan la dispersión, pero la estabilidad de la fase de tungsteno se mantiene en un nivel básico. Los estados químicos superficiales afectan el mecanismo; las capas de óxido bloquean los portadores, mientras que los recubrimientos protegen y restauran el rendimiento. Durante el procesamiento, el laminado induce textura, y los mecanismos de orientación mejoran la conductividad anisotrópica. Bajo factores ambientales, la corrosión altera la trayectoria de los portadores, y las películas de pasivación facilitan el mantenimiento.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.2.3 Estructura química que sustenta la estabilidad térmica de las láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno se derivan principalmente del equilibrio termodinámico de la estructura bifásica. El alto punto de fusión de la fase de tungsteno proporciona soporte estructural, mientras que la solución sólida de la fase aglutinante regula la distribución de tensiones y suprime la deformación a alta temperatura. El principio químico del soporte estructural implica la unión interfásica, con una mezcla de componentes metálicos y covalentes que garantiza que la red de enlaces no se desintegre a altas temperaturas. La capa de interfaz formada durante la sinterización crea una estructura de gradiente mediante difusión elemental, amortiguando las diferencias de expansión térmica y manteniendo la integridad general. El proceso de enfriamiento fija el soporte y las fases precipitadas fijan los límites de grano, lo que dificulta la migración.

El mecanismo de soporte también se refleja en la estabilidad microestructural: la esferoidización de las partículas de tungsteno reduce la concentración de tensiones y la distribución uniforme de la fase aglutinante dispersa la carga térmica. Químicamente, el fortalecimiento por solución sólida aumenta el punto de fusión de la fase, mientras que los elementos de aleación ajustan la energía libre y reducen la fuerza impulsora de la transformación de fase. Microscópicamente, el soporte implica vibraciones atómicas armoniosas y modos fonónicos coordinados entre fases, lo que previene el ablandamiento localizado. En términos macroscópicos, este soporte soporta aplicaciones de alta temperatura y su estabilidad se demuestra durante el calentamiento cíclico.

Análisis posteriores revelan que el mecanismo está influenciado por la química de oxidación, que forma una película protectora en la superficie para bloquear la difusión de oxígeno, manteniendo al mismo tiempo la estructura interna. Las impurezas interfieren con la estructura del soporte; el fósforo y otros elementos inducen fases frágiles, que se eliminan mediante procesos de alta pureza. El recocido optimiza la estructura del soporte, la difusión ajusta la composición y restablece el equilibrio. En un gradiente de temperatura, el soporte muestra una respuesta gradual, con la fase de tungsteno dominando en la región de baja temperatura y la fase aglutinante colaborando en la región de alta temperatura. El historial de procesamiento también influye en el mecanismo; la deformación previa introduce una red de dislocaciones, lo que mejora la resistencia a altas temperaturas. Durante la exposición ambiental, las pruebas de corrosión demuestran la fiabilidad del soporte, y la fase químicamente inerte prolonga su vida útil.

#### 4.3 Correlación entre las propiedades mecánicas y químicas de las láminas de aleación de tungsteno

Las láminas de aleación de tungsteno se reflejan principalmente en cómo la microestructura del material influye en el comportamiento macroscópico a través de la unión química y la distribución de elementos. Esta correlación ayuda a comprender el origen de propiedades como la dureza, la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión. Las propiedades mecánicas, como la resistencia y la tenacidad, a menudo se derivan de la disposición reticular y las interacciones interfases, mientras que las propiedades químicas, como la resistencia a la corrosión, involucran reacciones superficiales y el comportamiento electroquímico de los elementos. Ambas están estrechamente relacionadas a través de la química

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

interfacial. Por ejemplo, la estructura dura de la fase de tungsteno proporciona soporte mecánico, mientras que la solución sólida de la fase aglutinante modula la estabilidad química, conformando conjuntamente un equilibrio de rendimiento. El mecanismo de correlación incluye la contribución de la fuerza de enlace a nivel atómico; los enlaces metálicos dominan la dureza en la fase de tungsteno, mientras que los componentes covalentes mejoran la unión en la interfaz, lo que afecta la resistencia a la deformación. Las reacciones químicas durante la sinterización conforman la estructura; la fase líquida promueve la difusión de elementos, formando regiones de gradiente, reduciendo mecánicamente la concentración de tensiones y mejorando químicamente la resistencia a la oxidación.

El tratamiento térmico refuerza aún más la correlación; el recocido ajusta la posición de los elementos mediante difusión, optimizando la plasticidad mecánica y la inercia química. Bajo factores ambientales, la correlación se manifiesta como una respuesta sinérgica en el rendimiento; la humedad o los medios ácidos pueden debilitar simultáneamente la integridad mecánica y la capa protectora química. El historial de procesamiento afecta la correlación; la red de dislocaciones introducida por el laminado aumenta la resistencia mecánicamente y altera la distribución electrónica químicamente, lo que influye en el potencial de corrosión. El papel de las impurezas es fundamental; la segregación de oxígeno o fósforo forma regiones de enlace débiles químicamente y se convierte en puntos de inicio de grietas mecánicamente, lo que requiere purificación para mitigar estos efectos.

#### **4.3.1 Relación entre la dureza y la resistencia del enlace químico de las láminas de aleación de tungsteno**

de tungsteno y la resistencia de los enlaces químicos se basan en la diversidad y la distribución de la fuerza de los tipos de enlace dentro del material. Esta relación refleja cómo la interacción entre la fase de tungsteno y la fase aglutinante contribuye conjuntamente a la resistencia del material a la deformación. La dureza, como indicador mecánico, se origina a partir de la fuerza de las interacciones interatómicas, mientras que la fuerza de los enlaces químicos está influenciada por la energía de enlace y el grado de compartición de electrones. En las láminas de aleación de tungsteno, la estructura cúbica centrada en el cuerpo de la fase de tungsteno está dominada por enlaces metálicos, que tienen una alta fuerza de enlace y proporcionan dureza básica. La solución sólida cúbica centrada en la cara de la fase aglutinante introduce más componentes covalentes, regulando la red de enlace general. El núcleo de la relación radica en la mezcla de enlaces en la interfaz. El enlace de átomos de tungsteno con níquel o hierro forma una región de transición con una distribución de gradiente de fuerza de enlace, lo que ayuda a amortiguar las cargas externas.

La mejora de la resistencia de los enlaces químicos se consigue a menudo mediante el fortalecimiento de la solución sólida. Los elementos de aleación se disuelven en la red cristalina, causando distorsión y aumentando la resistencia al movimiento de dislocación, mejorando así la dureza. Dentro de la fase de tungsteno, la resistencia de los enlaces depende de la pureza; en un estado de alta pureza, los enlaces metálicos se distribuyen uniformemente, lo que resulta en una dureza estable. La introducción de impurezas debilita los enlaces, formando regiones blandas localizadas. En la fase aglutinante, la entremezcla de níquel-hierro mejora la resistencia de los enlaces, y los átomos de hierro ajustan la

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



densidad de la nube de electrones, promoviendo la estabilidad de los enlaces. El proceso de sinterización afecta a esta relación; la recombinación de enlaces se produce en la fase líquida y los precipitados refuerzan aún más la red de enlaces durante el enfriamiento, lo que provoca cambios en la dureza. La deformación por laminación induce tensión de enlace, enriqueciendo químicamente las dislocaciones con los elementos circundantes, aumentando la dureza localizada, pero requiere recocido para el equilibrio.

La relación se extiende a la dependencia de la temperatura; a altas temperaturas, las vibraciones de enlace aumentan, lo que provoca una disminución de la dureza. Sin embargo, la resistencia de enlace de la fase de tungsteno se mantiene relativamente estable, lo que facilita las aplicaciones en entornos térmicos. La resistencia de enlace químico superficial afecta las pruebas de dureza; las capas de óxido forman enlaces débiles, que requieren recubrimientos protectores para restaurarlos. La adición de impurezas como el carbono puede formar enlaces de carburo, que son fuertes pero requieren una distribución uniforme para evitar la fragilización. Bajo factores ambientales, la humedad promueve la formación de enlaces de hidrógeno, debilitando los enlaces superficiales y reduciendo indirectamente la dureza.

#### 4.3.2 Mecanismo de resistencia a la corrosión química de las láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno se derivan principalmente del diseño compuesto de la estructura del material y la sinergia de las reacciones químicas superficiales. Este mecanismo ayuda al material a mantener su integridad bajo fricción y acción de los medios. La resistencia al desgaste, como propiedad mecánica, implica un equilibrio entre la dureza y la tenacidad superficiales, mientras que la resistencia a la corrosión química inhibe la erosión mediante películas de pasivación y el comportamiento electroquímico elemental; ambos interactúan para formar un sistema protector. En las láminas de aleación de tungsteno, la fase de tungsteno proporciona la estructura resistente al desgaste, la fase aglutinante modula la actividad química y la distribución elemental en la interfaz optimiza el mecanismo de resistencia. La clave de este mecanismo reside en la transformación química durante la fricción; los átomos de la superficie se reorganizan bajo tensión para formar una capa de óxido o película de adsorción, lo que reduce la tasa de desgaste.

Los mecanismos de resistencia a la corrosión se logran mediante pasivación electroquímica, donde el níquel o el cobre promueven la formación de una película de óxido estable en la superficie, bloqueando la penetración del medio. Mecánicamente, la adhesión de la película depende de la fuerza de unión. En entornos de desgaste, el mecanismo implica el acoplamiento del desgaste oxidativo y corrosivo; las reacciones químicas generan productos protectores, reduciendo mecánicamente el coeficiente de fricción. Los procesos de sinterización dan forma a la estructura, donde la fase líquida promueve una microestructura uniforme y reduce las áreas sensibles a la corrosión. La textura de la superficie después del laminado afecta el mecanismo, alisando químicamente la superficie, reduce la retención del medio y distribuye mecánicamente la tensión uniformemente. Los mecanismos de interferencia de elementos de impurezas incluyen el enriquecimiento de fósforo y azufre, que induce corrosión localizada, lo que requiere purificación y control.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El mecanismo presenta una dependencia significativa de la temperatura; la oxidación se acelera a altas temperaturas, pero la estabilidad de la fase de tungsteno se mantiene. Los tratamientos de recubrimiento mejoran el mecanismo; el niquelado químico forma una barrera adicional que mejora la resistencia al desgaste. Medios ambientales como ácidos y álcalis alteran el mecanismo, y la adaptabilidad de la película de pasivación determina su rendimiento a largo plazo.

#### 4.3.3 El efecto de barrera química superficial de las láminas de aleación de tungsteno sobre la resistencia a la corrosión

La resistencia a la corrosión de las láminas de aleación de tungsteno se basa principalmente en la formación de películas de óxido y capas de adsorción. Esta función mantiene la estabilidad del material al evitar el contacto entre el medio y el sustrato. La resistencia a la corrosión, como propiedad química, se origina en el comportamiento electroquímico de los elementos superficiales, mientras que el efecto barrera implica la construcción de una estructura multicapa. Mecánicamente, la capa de película debe poseer adhesión para resistir el desprendimiento. En las láminas de aleación de tungsteno, la superficie de la fase de tungsteno se oxida fácilmente para formar una capa de  $WO_3$ , pero elementos aglutinantes como el níquel promueven la formación de una película compuesta, lo que mejora el efecto barrera. El principio subyacente es la estabilidad termodinámica y la baja energía libre de la película, lo que inhibe reacciones posteriores.

El efecto barrera se logra mediante la autopasivación; la película se autorepara tras la oxidación inicial y su composición química incluye óxido de níquel o de cobre. Mecánicamente, la flexibilidad de la película evita el agrietamiento. El estado de la superficie tras la sinterización influye en el rendimiento de la barrera; una superficie limpia facilita la formación uniforme de la película. La rugosidad de la superficie durante el laminado controla la eficacia de la barrera y, químicamente, las microtexturas aumentan los puntos de adhesión. El contenido inicial de impurezas, como el oxígeno, determina la calidad de la barrera; el exceso de oxígeno produce una película porosa. En condiciones ambientales, la barrera se adapta a diferentes medios; en condiciones ácidas, la película se disuelve y se reconstruye. Además, la temperatura afecta significativamente al rendimiento de la barrera; las altas temperaturas aceleran la difusión, pero mantienen la estabilidad y la función barrera de la película compuesta. La tecnología de recubrimiento amplía la eficacia de la barrera; el cromado al vacío forma una capa adicional que mejora la resistencia general.

#### 4.4 Análisis de correlación proceso-estructura-rendimiento de láminas de aleación de tungsteno

El análisis de correlación proceso-estructura-rendimiento de láminas de aleación de tungsteno se centra en la cadena lógica desde la preparación hasta el rendimiento final. Este análisis ayuda a comprender cómo los parámetros del proceso pueden controlar la microestructura, afectando así el comportamiento macroscópico. Las etapas del proceso, como la sinterización, el laminado y el tratamiento superficial, actúan a diferentes escalas: la sinterización establece la estructura inicial, el laminado optimiza aún más la deformación y el tratamiento superficial se centra en la interfaz química. La estructura, que actúa como intermediaria, incluye la distribución del grano, la unión en la interfase y los estados de defectos; estos

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

elementos se vinculan al rendimiento mediante la unión química y la difusión de elementos. El rendimiento abarca aspectos mecánicos, térmicos y químicos; por ejemplo, la dureza se deriva de la resistencia reticular y la resistencia a la corrosión depende de las barreras superficiales. La correlación se manifiesta como conducción multinivel: los procesos alteran la disposición atómica, la estructura ajusta la red de enlaces y el rendimiento responde en consecuencia. El marco analítico enfatiza los ciclos de retroalimentación; los resultados de las pruebas de rendimiento guían los ajustes del proceso, garantizando la idoneidad del material para aplicaciones industriales. Mediante este análisis, el diseño de láminas de aleación de tungsteno se vuelve más sistemático, lo que facilita su uso en campos de precisión.

En el análisis práctico, la correlación también implica el equilibrio entre la termodinámica y la cinética. La temperatura del proceso afecta la velocidad de difusión, y la estabilidad estructural determina la durabilidad del rendimiento. Las proporciones elementales desempeñan un papel puente en la correlación; un alto contenido de tungsteno resulta en una estructura densa y un rendimiento con tendencia a la alta densidad, pero requiere una compensación del proceso para la plasticidad. Los factores ambientales se incorporan al análisis; los cambios de humedad o temperatura prueban la robustez de la correlación. El control de impurezas se mantiene durante todo el proceso, y la purificación química evita que la amplificación de defectos afecte al rendimiento.

#### **4.4.1 El efecto del proceso de sinterización en la microestructura de las láminas de aleación de tungsteno**

El proceso de sinterización regula la microestructura de las láminas de aleación de tungsteno principalmente mediante parámetros como la temperatura, la atmósfera y el tiempo, controlando la formación de fases, la evolución de las partículas y la unión interfacial. Esta regulación sienta las bases para el posterior procesamiento y rendimiento del material. Durante la sinterización, la mezcla de polvos experimenta una transformación de difusión en fase sólida a formación en fase líquida. Las partículas de tungsteno se reorganizan al humedecerse la fase aglutinante, formando una estructura bifásica uniformemente distribuida. El control de la temperatura es crucial; las altas temperaturas promueven la formación de la fase líquida, y los elementos aglutinantes, como el níquel o el cobre, se funden y encapsulan las partículas de tungsteno, reduciendo químicamente la energía superficial y promoviendo la esferoidización de las partículas. En la sinterización en fase sólida se utilizan temperaturas más bajas para evitar que un exceso de fase líquida genere una estructura porosa. La atmósfera también influye en el control: el hidrógeno reduce los óxidos, manteniendo una interfaz limpia, mientras que el nitrógeno o el vacío suprimen la porosidad causada por el gas residual. Los parámetros de tiempo permiten una difusión suficiente; un tiempo de retención prolongado promueve una disolución limitada de los átomos de tungsteno en la fase aglutinante, y el enfriamiento posterior precipita las fases finas, reforzando la estructura.

El efecto regulador también se refleja en el ajuste del tamaño del grano. El calentamiento rápido puede retener partículas finas, mientras que un proceso lento permite el crecimiento. El mecanismo químico implica la maduración de Ostwald, donde las partículas más grandes engullen a las más pequeñas,

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

logrando un tamaño uniforme. La distribución de fases se controla mediante la dosificación; a medida que aumenta la proporción de la fase aglutinante, la estructura tiende hacia una red continua, mejorando la coherencia. La química interfacial se forma gradualmente durante la sinterización, aparecen regiones de gradiente elemental y la interdifusión de tungsteno y níquel crea una capa de transición, mejorando la unión. El control de defectos es un enfoque clave; la porosidad se reduce mediante el relleno en fase líquida, las dislocaciones se recuperan a altas temperaturas y las impurezas químicas se volatilizan y se expulsan, evitando la aglomeración. La estructura sinterizada proporciona una base para el laminado; la microestructura uniforme facilita la deformación sin agrietamiento.

Además, el efecto regulador se extiende a la etapa de tratamiento térmico. El recocido posterior a la sinterización homogeneiza aún más la estructura, difunde y ajusta las posiciones de los elementos y optimiza la composición del límite de grano. La combinación de parámetros del proceso permite una regulación específica; por ejemplo, al buscar una estructura de grano fino, se utilizan temperaturas más bajas y tiempos de mantenimiento más largos para inhibir químicamente la migración del límite de grano. La pureza atmosférica afecta el efecto regulador; un entorno de alta pureza reduce las inclusiones de óxido y mantiene la integridad estructural. El tratamiento de los elementos de impurezas se refleja en la sinterización; el fósforo y el azufre se eliminan mediante volatilización, y las bajas cantidades residuales resultan en estabilidad estructural. En términos de adaptabilidad ambiental, esta regulación asegura que la estructura se mantenga relativamente estable ante cambios de temperatura, lo que la hace adecuada para aplicaciones de ciclos térmicos.

#### **4.4.2 El mecanismo de influencia del proceso de laminación en las propiedades mecánicas de las láminas de aleación de tungsteno**

El proceso de laminado afecta las propiedades mecánicas de las láminas de aleación de tungsteno principalmente a través de cambios estructurales inducidos por la deformación, regulando la resistencia, la tenacidad y la dureza. Este mecanismo implica interacciones a múltiples niveles, incluyendo la acumulación de dislocaciones, el refinamiento del grano y la coordinación de la interfase. Durante el laminado, ya sea en caliente o en frío, la fase de tungsteno soporta la tensión principal, mientras que la fase aglutinante asiste en el flujo de deformación, lo que conduce a la reconstrucción de la red de enlaces químicos, una mayor densidad de dislocaciones y una mejor resistencia a la fluencia. El laminado en caliente, con su temperatura más alta, provoca una recuperación dinámica, donde la difusión promueve la curación de defectos cristalinos y previene la fragilidad. El laminado en frío introduce un mayor endurecimiento por acritud, lo que implica la activación del sistema de deslizamiento, el alargamiento de las partículas de tungsteno a lo largo de la dirección de laminado, la formación de una textura fibrosa y la mejora de las propiedades de tracción.

El mecanismo de influencia también se refleja en el ajuste de la tenacidad. El laminado multipaso acompañado de recocido intermedio permite la difusión química para ajustar la distribución de la tensión y reducir la tendencia al agrietamiento causado por la tensión residual. El mecanismo de control de la reducción es crucial; grandes reducciones inducen núcleos de recristalización, refinan los granos y mejoran el equilibrio entre resistencia y tenacidad. En el mecanismo de interfase, la fase aglutinante actúa

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



como una capa amortiguadora, absorbiendo la energía de deformación, y la fuerza del enlace químico determina la eficiencia de coordinación. La evolución de defectos también es un componente del mecanismo; el laminado genera paredes de dislocación y, químicamente, la segregación de elementos y el anclaje estabilizan la estructura. Los efectos superficiales también se reflejan en el mecanismo; el acabado del laminado afecta el rendimiento a la fatiga y reduce químicamente los puntos de inicio de la oxidación.

Un análisis posterior revela una importante dependencia de la temperatura del mecanismo, que combina las ventajas del laminado en caliente con las del laminado en frío. El mecanismo presenta recuperación y endurecimiento, optimizando así las propiedades mecánicas. Parámetros del proceso, como la velocidad de laminado, influyen en el mecanismo, reduciendo rápidamente el tiempo de recuperación y aumentando la dureza. Las impurezas interfieren con el mecanismo; el oxígeno y otros elementos inducen grietas, lo que requiere una purificación previa para mitigar estos efectos.

#### 4.4.3 Ruta de optimización del tratamiento superficial sobre las propiedades químicas de láminas de aleación de tungsteno

El tratamiento superficial optimiza las propiedades químicas de las láminas de aleación de tungsteno, principalmente mediante métodos como el enchapado, la oxidación o la modificación química para crear una interfaz protectora. Este enfoque mejora el comportamiento químico, como la resistencia a la corrosión, la resistencia a la oxidación y la afinidad. El proceso implica la limpieza de la superficie seguida de la deposición de una película, formando una nueva capa de fase química que bloquea la intrusión del medio. La galvanoplastia es común, donde se depositan capas de níquel u oro electroquímicamente, optimizando la formación de una película densa mediante la reducción iónica, con una adhesión que depende de la difusión de los elementos de la matriz. El enchapado al vacío se utiliza en entornos de alta temperatura, donde la deposición de aluminio por evaporación forma una barrera de alúmina, lo que resulta en una alta estabilidad química. El pulido químico elimina los defectos superficiales; en condiciones ácidas, la fase de tungsteno se disuelve ligeramente, alisando la interfaz y mejorando la inercia química.

La vía de optimización también incluye tratamientos compuestos, difusión térmica posterior al recubrimiento, mejora de la unión química e interpenetración elemental dentro de la vía para formar regiones de gradiente y mejorar la adhesión. La vía de implantación iónica introduce nitrógeno o carbono, endureciendo la superficie y optimizando la química; el mecanismo implica la incrustación atómica en la red cristalina, alterando la estructura electrónica y mejorando la resistencia dieléctrica. La vía de oxidación anódica genera una película de óxido; en condiciones electrolíticas, se autogenera una capa de óxido de tungsteno; la vía controla el voltaje para ajustar el espesor; y la capa de película pasivante química pasiva el sustrato. El pretratamiento de limpieza es fundamental para la vía; el tratamiento ultrasónico o de plasma elimina los contaminantes para garantizar una adhesión posterior uniforme.

Además, el control de la temperatura es crucial en la trayectoria de recubrimiento; el tratamiento a baja temperatura preserva la estructura del sustrato, mientras que la difusión a alta temperatura optimiza la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

interfaz. Las impurezas afectan la trayectoria de recubrimiento y los residuos superficiales interfieren en la formación de la película, lo que requiere una limpieza en varios pasos para mitigar este problema. Las trayectorias de recubrimiento adaptables al entorno implican la selección de recubrimientos específicos para medios ácidos y alcalinos, cuya eficacia depende de la compatibilidad química. El tratamiento posterior al recocido estabiliza aún más la capa de película, garantizando una difusión uniforme y mejorando el rendimiento químico a largo plazo.

#### 4.5 Respuesta estructural y de rendimiento de láminas de aleación de tungsteno en entornos especiales

de tungsteno en entornos especiales reflejan principalmente la adaptación del material a las condiciones externas. Esta respuesta implica la evolución de la microestructura y el ajuste del comportamiento macroscópico, lo que ayuda a comprender cómo los materiales mantienen su función en condiciones como alta temperatura, radiación o presión. Las respuestas estructurales incluyen cambios de grano, interacciones interfásicas y dinámica de defectos, mientras que las respuestas de rendimiento se reflejan en aspectos mecánicos, térmicos y químicos, como la estabilidad térmica a altas temperaturas, la resistencia química bajo radiación y la evolución mecánica bajo presión. El mecanismo de respuesta se deriva del equilibrio entre la elasticidad de los enlaces químicos y la estructura de la fase; la fase de tungsteno proporciona soporte esquelético, mientras que la fase aglutinante modula el tampón. La superposición de factores ambientales complica la respuesta: el aumento de temperatura puede inducir difusión, la radiación afecta la estructura electrónica y la presión altera el espaciamiento interatómico. El análisis de correlación enfatiza una perspectiva multiescala, desde la reconstrucción de enlaces a nivel atómico hasta la degradación macroscópica del rendimiento. Los pretratamientos del proceso, como la optimización de la aleación, pueden mejorar la capacidad de respuesta, y los ajustes de la relación elemental ayudan a que la estructura se establezca gradualmente en el entorno.

En las respuestas prácticas, la interacción entre la estructura y el rendimiento forma un bucle de retroalimentación. La estructura inicial determina el punto de partida de la respuesta, mientras que la evolución posterior afecta la durabilidad del rendimiento. Es necesario considerar el papel de las impurezas; el oxígeno, por ejemplo, puede acelerar los cambios negativos en la respuesta, que pueden mitigarse mediante la purificación. Con cambios graduales en el gradiente de temperatura o la dosis de radiación, la respuesta presenta no linealidad, estabilizándose al principio y acelerándose después. Las respuestas a la presión implican compresión volumétrica, y la compresión de los enlaces químicos aumenta la resistencia.

##### 4.5.1 Cambios en la estabilidad estructural de láminas de aleación de tungsteno en condiciones de alta temperatura

de tungsteno a altas temperaturas se originan principalmente en procesos de difusión activados térmicamente y en la coordinación de la expansión térmica interfacial. Estos cambios afectan la integridad general y la continuidad funcional del material. A altas temperaturas, la red cúbica centrada en el cuerpo de la fase de tungsteno permanece relativamente estable, pero la migración atómica

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

comienza en la solución sólida de la fase aglutinante. Los átomos de tungsteno se disuelven desde los bordes de las partículas hacia la fase aglutinante, formando un estado sobresaturado. Con el aumento de la temperatura, esta disolución se intensifica, modificando la curvatura superficial de las partículas, lo que provoca una contracción gradual de las partículas pequeñas y un ligero aumento del tamaño de las partículas grandes, lo que resulta en una estructura más gruesa. El mecanismo implica la química interfacial; la energía térmica impulsa la difusión elemental, con átomos de níquel o cobre penetrando en la fase de tungsteno para formar delgadas zonas de solución sólida, regulando la distribución de la tensión y evitando la separación interfacial. Al enfriarse, el tungsteno sobresaturado precipita fases finas, fijando los límites de grano y restaurando parcialmente la estructura inicial; sin embargo, la repetición de ciclos puede acumular cambios residuales.

Los cambios estructurales también se reflejan en la dinámica de los defectos. A altas temperaturas, el ascenso de dislocaciones es activo, la concentración de vacantes aumenta y las impurezas químicas, como el oxígeno, se acumulan en los límites de grano, formando películas compuestas que afectan las tasas de migración. La distribución de fases cambia gradualmente; la fase aglutinante puede expandirse ligeramente, pero el bajo coeficiente de expansión de la fase de tungsteno amortigua la deformación general. El grado de cambio depende de la duración de la exposición ambiental; la exposición a corto plazo resulta en una mejor recuperación estructural, mientras que la exposición a largo plazo puede conducir a núcleos de recristalización, formando nuevos granos y optimizando la estabilidad. Los enlaces químicos se reconstruyen durante estos cambios; los enlaces metálicos mantienen la resistencia en la fase de tungsteno, mientras que los componentes covalentes mejoran la resistencia térmica en la interfaz. El recocido puede controlar estos cambios; controlar la velocidad de enfriamiento fija una estructura favorable y evita un engrosamiento excesivo.

Análisis posteriores revelan que el cambio de umbral de temperatura está relacionado con el sistema de aleación. El sistema níquel-hierro presenta un engrosamiento progresivo a temperaturas más altas, mientras que el sistema níquel-cobre responde de manera uniforme debido a la conductividad térmica del cobre. El control de impurezas influye en los cambios; elementos como el fósforo inducen un ablandamiento localizado, que requiere una purificación previa. En presencia de humedad ambiental, esta puede promover la oxidación superficial, provocando que los cambios estructurales se extiendan de afuera hacia adentro, formando regiones de gradiente. La respuesta mecánica se correlaciona con los cambios estructurales; bajo fluencia a alta temperatura, las partículas se deslizan y la fase aglutinante se deforma de manera coordinada. En entornos de ciclos térmicos, los cambios indican acumulación de fatiga, y el debilitamiento del límite de grano debe mitigarse mediante dopaje.

#### 4.5.2 Resistencia estructural química de láminas de aleación de tungsteno en entornos de radiación

de tungsteno en entornos de radiación se basa principalmente en la respuesta de la microestructura del material a la deposición de energía. Esta tolerancia ayuda al material a mantener la integridad de su red de enlaces químicos y su estructura de fases bajo la influencia de la radiación o partículas. Al ser bombardeadas con radiación, como rayos X o haces de electrones, el alto número atómico de la fase de tungsteno absorbe energía, lo que provoca desplazamientos en cascada. Químicamente, los enlaces

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

atómicos se rompen brevemente y luego se reestructuran, formando grupos de defectos puntuales. El mecanismo de tolerancia estructural implica ajustes en la estructura electrónica; la radiación induce excitación electrónica, provocando que los electrones de la capa externa de los átomos de tungsteno salten, pero estos se relajan rápidamente y vuelven al equilibrio. La solución sólida de la fase aglutinante amortigua el impacto, y la distribución uniforme de átomos de níquel o cobre dispersa la energía, previniendo daños localizados. La química de la interfaz influye en la tolerancia; la interpenetración de elementos en regiones de gradiente mejora la resistencia de los enlaces y los átomos desplazados por la radiación se autorreparan.

La tolerancia también se refleja en la evolución de los defectos: la radiación genera pares vacantes-intersticiales, la difusión química promueve la recombinación y reduce la acumulación. La distribución de fases se mantiene estable; las partículas de tungsteno protegen la fase aglutinante, reduciendo el flujo de radiación. La dependencia de estos cambios con la dosis es significativa: las dosis bajas resultan en un ajuste fino de la estructura, mientras que las dosis altas pueden inducir hinchamiento, con ligeros cambios de volumen que se mitigan mediante dopaje. El estado químico responde a la radiación; pueden formarse películas de óxido, y la pasivación superficial mejora la tolerancia. El recocido también mejora la tolerancia; la energía térmica impulsa la migración de defectos, restaurando el orden reticular.

Los sistemas de aleación presentan diferencias significativas en durabilidad. El sistema níquel-hierro muestra una respuesta coordinada bajo la radiación del campo magnético, mientras que el sistema níquel-cobre distribuye la energía uniformemente gracias a su conductividad. Las impurezas afectan la durabilidad; el oxígeno y otros elementos capturan los productos de la radiación, formando compuestos que requieren purificación y control. En condiciones ambientales como el calentamiento radiativo, la durabilidad muestra sinergia, ya que la difusión térmica acelera la reparación de defectos. En relaciones mecánicas, el endurecimiento por radiación mejora la resistencia, pero es necesario monitorizar los cambios de tenacidad. Bajo exposición prolongada, la durabilidad muestra un cambio gradual, adaptándose la estructura al campo de radiación y permitiendo un funcionamiento continuo.

#### 4.5.3 Evolución del rendimiento de las láminas de aleación de tungsteno bajo presión extrema

de tungsteno bajo presión extrema se derivan principalmente de la respuesta compresiva de la estructura y el proceso dinámico de coordinación de interfase. Este proceso dinámico influye en el comportamiento mecánico y la estabilidad química del material, lo que ayuda a comprender el mecanismo de adaptación a alta presión. Cuando se aplica presión, la red de la fase de tungsteno se comprime, el espaciado interatómico disminuye, la fuerza del enlace químico aumenta y la dureza aumenta. La evolución implica cambios de volumen y contracción general del material, pero la ductilidad de la fase aglutinante amortigua la tendencia frágil de la fase de tungsteno, evitando la fragmentación. En este mecanismo, el movimiento de dislocación es activo, el sistema de deslizamiento se activa bajo alta presión, la distribución de elementos químicos se ajusta y la concentración de tensión se dispersa. La interfaz juega un papel crucial; la coordinación de la deformación en la región del gradiente evita la separación.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



La evolución del rendimiento también se refleja en el equilibrio entre tenacidad y resistencia; la resistencia aumenta inicialmente, la tenacidad disminuye gradualmente y se produce una recuperación parcial tras la liberación de presión. La dinámica de los defectos se muestra sistemáticamente: la compresión de las vacantes reduce la resistencia, se forman paredes de dislocación y la difusión química promueve la estabilización. La distribución de fases responde a la presión; las partículas de tungsteno se compactan más y la fase aglutinante rellena los huecos, optimizando la coherencia. El umbral de presión para la evolución depende del sistema; los sistemas de níquel-hierro muestran un endurecimiento progresivo, mientras que los de níquel-cobre responden de manera uniforme debido a la conductividad térmica. El tratamiento a alta presión tras el recocido puede regular la evolución y restablecer el equilibrio estructural.

El efecto de superposición de temperatura regular es significativo; la difusión se mejora con el calentamiento a alta presión y la evolución se acelera, pero esto puede controlarse mediante enfriamiento. Las impurezas interfieren con la regularidad; el fósforo y otros elementos inducen regiones débiles locales, que requieren purificación para su mitigación. Factores ambientales, como los ciclos de presión, causan fatiga en la evolución, y los cambios estructurales graduales requieren la optimización del dopaje. En cuanto a las propiedades químicas, la compresión de enlaces a alta presión mejora la resistencia a la corrosión y aumenta la densidad de la barrera superficial. Bajo alta presión a largo plazo, la evolución refleja adaptación y el rendimiento tiende a estabilizarse, soportando cargas continuas.

#### 4.6 CTIA GROUP LTD Hoja de aleación de tungsteno MSDS

GRUPO CTIA LTD. La MSDS de las láminas de aleación de tungsteno se basa en normas como la GB/T 16483-2008 "Contenido y orden de los elementos en las fichas de datos de seguridad de productos químicos". Describe detalladamente las propiedades fisicoquímicas, la identificación de peligros y las medidas de respuesta ante emergencias, en combinación con los componentes específicos del producto, como la proporción de tungsteno, níquel, hierro o cobre.

Las aleaciones de tungsteno incluyen el tungsteno como componente principal, lo que proporciona la base para una alta densidad y dureza, complementado con níquel, hierro o cobre como fases aglutinantes, con proporciones ajustadas según la serie. Por ejemplo, en el sistema tungsteno-níquel-hierro, la relación níquel-hierro equilibra la humectación y el endurecimiento. Los oligoelementos como el carbono y el oxígeno se controlan en niveles bajos para evitar la formación de fases de fragilización. Químicamente, esta parte utiliza números CAS para identificar los elementos: tungsteno CAS 7440-33-7 y níquel CAS 7440-02-0. Las impurezas reveladas incluyen contaminantes potenciales como fósforo y azufre, provenientes de las materias primas, y se enfatizan los procesos de purificación para reducir su contenido.

La información compositiva 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.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Capítulo 5 Métodos de prueba y caracterización del rendimiento de láminas de aleación de tungsteno

### 5.1 Técnicas de análisis de la composición química de láminas de aleación de tungsteno

Las láminas de aleación de tungsteno se enfocan principalmente en sus características compuestas de múltiples elementos, empleando métodos espectroscópicos, de fluorescencia y químicos húmedos para lograr la detección cualitativa y cuantitativa de elementos principales como tungsteno, níquel, hierro y cobre, así como impurezas traza. Estas técnicas desempeñan un papel en el control de calidad del material, ayudando a verificar las proporciones de la aleación, la pureza y la homogeneidad. La espectroscopia de absorción atómica y la espectroscopia de emisión son adecuadas para la determinación elemental de muestras disueltas, la espectroscopia de fluorescencia de rayos X proporciona un análisis no destructivo y rápido, y la titulación química se utiliza para oligoelementos específicos. La preparación de la muestra antes del análisis incluye corte, disolución o limpieza de la superficie; la disolución comúnmente utiliza una mezcla de ácido nítrico y ácido fluorhídrico para tratar la fase refractaria de tungsteno. La elección de la técnica depende del tipo y contenido del elemento; los métodos de fluorescencia son adecuados para elementos principales como el tungsteno con una alta proporción, mientras que los métodos espectroscópicos de alta sensibilidad son necesarios para oligoelementos. Los resultados analíticos guían los ajustes del proceso, asegurando la confiabilidad de los materiales en aplicaciones industriales.

Estas técnicas también consideran los efectos de la matriz; la alta densidad de la matriz de tungsteno puede interferir con la señal, lo cual se mitiga mediante la calibración con muestras estándar. Los métodos no destructivos, como la espectroscopia de fluorescencia, facilitan la detección en línea, mientras que los métodos destructivos, como la espectroscopia de absorción, ofrecen mayor precisión. El análisis de impurezas se centra en el oxígeno, el carbono, el fósforo, etc., que afectan la estabilidad del tejido. Las técnicas pueden combinarse para formar un sistema completo, como el cribado de fluorescencia seguido de un análisis espectral preciso. Debido a factores ambientales, el análisis debe realizarse en un laboratorio limpio para evitar la contaminación.

#### 5.1.1 Análisis espectral de absorción y emisión atómica de láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno son técnicas comúnmente utilizadas para la cuantificación elemental tras la disolución de la muestra. La AAS se basa en la absorción de la luz característica por los átomos, mientras que la AE utiliza las líneas espectrales características emitidas por los átomos excitados. La combinación de estos dos métodos permite cubrir elementos principales como tungsteno, níquel, hierro y cobre, así como impurezas traza. En el análisis AAS, la muestra se disuelve en ácido para formar una solución, que posteriormente se nebuliza y se introduce en un horno de llama o de grafito. Los átomos del elemento absorben la luz característica emitida por una lámpara de cátodo hueco; la intensidad de absorción depende de la concentración y el contenido se calcula mediante una curva estándar. Este método es muy aplicable a las láminas de aleación de tungsteno, especialmente para determinar bajas concentraciones de níquel o hierro, ya que el mecanismo de absorción atómica en estado fundamental garantiza la selectividad. La preparación de la muestra debe tener en cuenta la baja solubilidad del tungsteno; se suele

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

utilizar una mezcla de ácido nítrico y ácido fluorhídrico para la disolución. La interferencia de los iones fluoruro se evita añadiendo ácido bórico para la complejación. El AAS de llama es adecuado para elementos con concentraciones más altas, mientras que el AAS de horno de grafito mejora la sensibilidad para la detección de oligoelementos.

La espectroscopia de emisión óptica (EEO) introduce muestras disueltas en plasma o un arco eléctrico para su excitación, detectando las líneas espectrales características emitidas por átomos o iones. La intensidad se registra mediante espectroscopia de rejilla y un detector, lo que permite la determinación simultánea de múltiples elementos. En láminas de aleación de tungsteno, su alto punto de fusión requiere una fuente de excitación de alta energía, como el plasma acoplado inductivamente (ICP-EEO), donde las transiciones de estado químicamente excitadas proporcionan información espectral completa. La corrección por coincidencia de matriz es necesaria, ya que la matriz de tungsteno puede causar interferencia de fondo, que se optimiza mediante métodos de patrón interno o sustracción de fondo. La ventaja de la EEO reside en su rápido análisis de múltiples elementos, lo que la hace adecuada para la validación de lotes de producción. Ambas tecnologías se complementan: la AAS es más precisa para elementos específicos, mientras que la EEO cubre un amplio espectro.

El proceso analítico también implica la calibración de instrumentos, el establecimiento de curvas con soluciones patrón certificadas y la garantía de un muestreo uniforme de láminas de aleación de tungsteno para evitar la segregación. Las interferencias químicas, como la ionización, se mitigan en el OES mediante la adición de inhibidores. Por razones de seguridad, la disolución ácida requiere aireación. Los resultados se expresan generalmente como porcentajes de masa para facilitar la evaluación del equilibrio estequiométrico de sistemas de aleación como níquel-hierro o níquel-cobre.

### 5.1.2 Método cuantitativo para espectroscopia de fluorescencia de rayos X Composición de láminas de aleación de tungsteno

La espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) para el análisis cuantitativo de láminas de aleación de tungsteno es una técnica no destructiva de análisis de superficies. Utiliza rayos X para excitar los átomos de la muestra, produciendo una fluorescencia característica cuya intensidad se correlaciona con el contenido elemental, lo que permite la determinación rápida de elementos como tungsteno, níquel, hierro y cobre. El método se divide en dispersivo en longitud de onda (WD-XRF) y dispersivo en energía (ED-XRF). El primero ofrece alta resolución, ideal para análisis precisos de laboratorio, mientras que el segundo es portátil y adecuado para aplicaciones de campo. La preparación de la muestra es sencilla; la superficie de la lámina de aleación de tungsteno solo requiere pulido y limpieza para evitar la interferencia de la capa de óxido. Químicamente, los rayos X característicos se originan en las transiciones electrónicas de la capa interna, lo que garantiza la especificidad elemental. Una fuente de excitación, como un tubo de rayos X, genera rayos X primarios, que son absorbidos por los átomos de la muestra y emiten fluorescencia secundaria, que es captada por un detector.

El análisis cuantitativo se basa en el método de parámetros fundamentales o en el método de corrección empírica. El primero calcula el efecto de la matriz, mientras que el segundo establece curvas utilizando

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

muestras estándar. El alto contenido de tungsteno en las láminas de aleación de tungsteno provoca una fuerte absorción, lo que requiere estándares adaptados a la matriz para su mitigación. La WD-XRF separa con precisión las líneas espectrales mediante espectroscopia de cristal, lo que la hace adecuada para la cuantificación de elementos mayoritarios; la ED-XRF, aunque con una menor resolución energética, es muy eficiente para la detección simultánea de múltiples elementos. La ventaja de este método reside en su naturaleza no destructiva, que preserva la integridad de la muestra y facilita la repetición de las mediciones. El análisis de profundidad se limita a superficies con una separación de unos pocos micrómetros y es adecuado para láminas uniformes.

Las interferencias químicas, como la superposición de líneas espectrales, se resuelven mediante análisis espectral basado en software. La posible superposición de las líneas L de tungsteno y las líneas K de níquel requiere corrección algorítmica. Las atmósferas de vacío o helio mejoran la detección de elementos ligeros, pero los elementos pesados están fácilmente disponibles en condiciones atmosféricas para las láminas de aleación de tungsteno. La tecnología XRF portátil se está extendiendo al cribado rápido en entornos de producción. La fiabilidad de los resultados se ha verificado utilizando materiales de referencia certificados, con desviaciones controladas dentro de límites aceptables. El sistema ofrece alta seguridad y no requiere reactivos químicos.

### 5.1.3 Análisis de titulación química de oligoelementos en láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno son un método clásico de química húmeda. Implica disolver la muestra y hacerla reaccionar con reactivos estándar; el punto final se determina por el cambio de color o el cambio de potencial de un indicador. Este método es adecuado para impurezas traza específicas como fósforo, azufre o ciertos iones metálicos. La muestra debe estar completamente disuelta antes del análisis. Las láminas de aleación de tungsteno a menudo se tratan con una mezcla de ácido nítrico y ácido fluorhídrico por calentamiento, que forma químicamente un complejo soluble de tungsteno, evitando la interferencia de la precipitación. Los oligoelementos como el fósforo a menudo se titulan después de la complejación con azul fosfomolibdico, o el azufre se separa por precipitación antes de la determinación. Los tipos de titulación incluyen redox, complejación y titulaciones ácido-base, seleccionadas en función de las propiedades del elemento.

La titulación complexométrica suele utilizar EDTA como titulante para determinar desviaciones mínimas en níquel o hierro, controlando la reacción el equilibrio químico. La titulación redox es adecuada para el azufre o ciertos elementos de transición, y la titulación con permanganato de potasio o yodométrica se utiliza habitualmente. La selección del indicador es crucial; un cambio de color claro indica el punto final. El volumen y la concentración de la muestra deben ser precisos; el microanálisis amplifica los errores y los reduce mediante múltiples análisis paralelos. Es necesario un pretratamiento de separación química; por ejemplo, el fósforo debe extraerse de la matriz de tungsteno para evitar la interferencia del elemento principal.

Las ventajas del método residen en su equipo sencillo, su bajo coste y su idoneidad para la verificación de resultados espectrales en laboratorio. La sensibilidad puede mejorarse mediante la amplificación de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



la reacción, como la determinación espectrofotométrica del punto final. Las precauciones de seguridad incluyen garantizar una ventilación adecuada durante la manipulación de ácidos y evitar los riesgos del fluoruro de hidrógeno.

## 5.2 Métodos de caracterización de la microestructura para láminas de aleación de tungsteno

tungsteno utilizan principalmente microscopía electrónica (SEM), análisis espectral y técnicas de difracción. Estos métodos revelan la distribución del grano, la composición de las fases y las características de los defectos del material a diferentes escalas, lo que ayuda a comprender la relación entre la estructura y las propiedades. La microscopía electrónica de barrido (SEM) se utiliza para la morfología superficial y la distribución compositiva, la difracción de rayos X (DRX) analiza las fases y las estructuras cristalinas, y la microscopía electrónica de transmisión (TEM) se centra en los defectos internos. La preparación de la muestra antes de la caracterización implica el corte, el pulido y la dilución iónica para garantizar la ausencia de contaminación. La elección del método depende del enfoque de la investigación: se prefiere SEM para el análisis de superficies, difracción para la información cristalina y TEM para defectos a nanoescala. La combinación de estos métodos crea una caracterización multidimensional; por ejemplo, la combinación de SEM y difracción puede confirmar la estructura de las fases. La base química de estos métodos reside en la interacción entre los electrones y la materia, donde las señales de excitación reflejan la disposición atómica. El control ambiental, como el vacío, es crucial para prevenir la oxidación.

### 5.2.1 Mapeo de la morfología y composición de láminas de aleación de tungsteno mediante microscopía electrónica de barrido

de tungsteno es un método común para caracterizar la microestructura. Al escanear la superficie de la muestra con un haz de electrones para generar señales de electrones secundarios y retrodispersados, se revela la morfología de las partículas de tungsteno, la distribución de la fase aglutinante y las características de la interfaz. Simultáneamente, la espectroscopia de energía dispersiva (EDS) mapea la distribución espacial de los elementos. Este método se basa en la interacción entre electrones y átomos. Los electrones incidentes excitan los átomos de la muestra para generar señales características, los electrones secundarios reflejan la morfología superficial y los electrones retrodispersados dependen de las diferencias en el número atómico. El alto número atómico del tungsteno hace que sus partículas sean más brillantes que la fase aglutinante, lo que facilita su diferenciación. La preparación de la muestra incluye un pulido mecánico seguido de un pulido electrolítico o iónico. La superficie debe estar recubierta de carbono u oro para evitar efectos de carga. La obtención de imágenes se realiza en un entorno de vacío, con ajustes del voltaje de aceleración para equilibrar la resolución y la profundidad de penetración; el bajo voltaje es adecuado para los detalles de la superficie, mientras que el alto voltaje permite una observación más profunda.

En la observación morfológica, se revela claramente la estructura bifásica de la lámina de aleación de tungsteno. Las partículas de tungsteno son esféricas o poliédricas, y la fase aglutinante rellena los huecos formando una red continua. El aumento se puede ajustar para examinar grietas o poros en los límites de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

grano. El mapeo de la composición química utiliza un detector de rayos X para recopilar picos característicos, y el procesamiento por software genera mapas de distribución elemental. Las regiones de tungsteno muestran señales densas, mientras que el níquel o el hierro se enriquecen en la fase aglutinante, lo que revela regiones de segregación o gradiente. La resolución del mapeo depende de la eficiencia del detector y del tiempo de escaneo; escaneos más largos mejoran la relación señal-ruido. La ventaja de este método reside en su intuitiva combinación de información morfológica y química, lo que facilita el análisis de defectos estructurales causados por la falta de homogeneidad en la sinterización. Los modos auxiliares, como la difracción por retrodispersión de electrones, pueden caracterizar con mayor precisión la orientación del cristal; químicamente, los elementos que se segregan en los límites de grano afectan el patrón de difracción.

Además, este método desempeña un papel en el seguimiento de los cambios estructurales después del tratamiento térmico; las comparaciones de muestras recocidas muestran una esferoidización de partículas mejorada y una mejor unión entre interfases. Los modos de escaneo ambiental permiten la observación de muestras húmedas, pero las láminas de aleación de tungsteno se analizan típicamente en estado seco. El software de procesamiento de imágenes ayuda a cuantificar la distribución del tamaño de partícula y la fracción de volumen de fase; los datos de mapeo químico se pueden superponer con imágenes de morfología para proporcionar una vista compuesta. El mapeo de elementos de impurezas como el oxígeno revela la ubicación de inclusiones de óxido, guiando los procesos de purificación. La limitación de este método radica en su sensibilidad superficial; se requiere observación transversal para evaluar la estructura profunda. En resumen, la morfología de la microscopía electrónica de barrido y el mapeo de la composición proporcionan un enfoque integral de caracterización microscópica para láminas de aleación de tungsteno, lo que permite la visualización de la química estructural a través de mecanismos de señales electrónicas y respalda la evaluación de calidad de los materiales en aplicaciones de precisión. Este método también permite la identificación efectiva de la heterogeneidad estructural, lo que impulsa la optimización de los parámetros de procesamiento.

### 5.2.2 Análisis de la fase y la estructura cristalina por difracción de rayos X de láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno es una técnica de caracterización no destructiva. Utiliza la interacción de rayos X con los planos atómicos de un cristal para generar picos de difracción, identificar la composición de fases y resolver los parámetros de red para comprender el equilibrio de fases y la estabilidad estructural del sistema de aleación. Este análisis se basa en la ley de Bragg: los rayos X incidentes son reflejados por el cristal, las posiciones de los picos corresponden al espaciamiento interplanar y la intensidad refleja la disposición atómica. Las muestras pueden ser láminas enteras o polvos, con superficies lisas para evitar la interferencia por dispersión. Los rayos Cu-K $\alpha$  se utilizan comúnmente como fuente, los detectores recopilan señales de difracción y el software compara tarjetas estándar para identificar fases, como los picos cúbicos centrados en el cuerpo del tungsteno y los picos cúbicos centrados en las caras de la fase aglutinante. En el análisis de fases, las láminas de aleación de tungsteno muestran picos de tungsteno fuertes y agudos, mientras que los picos de la fase aglutinante son más débiles. La disolución de los elementos de aleación provoca desplazamientos de los picos, lo que revela el grado de solución sólida.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El análisis de la estructura cristalina implica el ajuste de picos para calcular las constantes reticulares. El parámetro  $\alpha$  de la fase de tungsteno cambia solo ligeramente con la temperatura, mientras que la fase aglutinante se expande o se contrae dependiendo de la proporción de hierro o cobre. La influencia de la composición química en la difracción se refleja en el ancho del pico; el refinamiento del grano conduce al ensanchamiento, mientras que las muestras recristalizadas muestran un estrechamiento del pico. El análisis de fase cuantitativo estima las fracciones de volumen utilizando proporciones de intensidad integradas, lo que ayuda a comprender la formación de la fase sinterizada. Las ventajas de este método incluyen el escaneo rápido de lotes de muestras, operable tanto en dispositivos portátiles como de laboratorio. Los modos avanzados, como la difracción de calentamiento in situ, rastrean las transiciones de fase de alta temperatura y observan químicamente el comportamiento de disolución del tungsteno. El procesamiento de datos incluye la sustracción de fondo y la separación de picos; los espectros complejos requieren un ajuste de múltiples picos.

Además, este análisis es eficaz para evaluar estructuras de deformación laminadas; las variaciones en la intensidad de los picos de textura reflejan la distribución de la orientación, y químicamente, la deformación inducida por la deformación afecta el desplazamiento de los picos. Las fases de impurezas, como los óxidos, presentan picos débiles pero detectables, lo que orienta la purificación. El control ambiental mediante vacío o gas inerte evita la interferencia de los picos de oxidación. Los resultados de difracción se confirman combinando estos métodos con otras técnicas de caracterización, como la microscopía electrónica.

### 5.2.3 Observación de defectos microscópicos en láminas de aleación de tungsteno mediante microscopía electrónica de transmisión

de tungsteno son una técnica de caracterización de alta resolución. Al usar un haz de electrones de alta energía para penetrar muestras delgadas y generar imágenes de campo claro y campo oscuro y patrones de difracción, revela defectos a escala nanométrica como dislocaciones, vacantes, límites de grano y precipitados, lo que ayuda en el análisis del impacto de la estructura en el rendimiento. Esta observación se basa en la interacción entre las ondas electrónicas y el cristal; la microscopía electrónica de transmisión revela contrastes de defectos, mientras que la difracción electrónica proporciona información local del cristal. Las muestras deben adelgazarse iónicamente a decenas de nanómetros para evitar la flexión o la contaminación. Se utilizan altos voltajes de aceleración para penetrar la alta densidad del tungsteno. Químicamente, la dispersión de electrones depende del número atómico, y el tungsteno tiene un contraste relativamente fuerte con la fase aglutinante. En la observación de defectos, las líneas de dislocación aparecen dobladas en la imagen de campo claro, y la segregación de los elementos centrales de la dislocación química afecta la migración.

La observación del límite de grano revela la estructura de la interfaz; las imágenes de alta resolución muestran la disposición atómica; químicamente, los elementos segregantes, como el boro, se acumulan en la interfaz, lo que mejora la unión. Las fases precipitadas, como las partículas finas de tungsteno, se visualizan en una red dentro de la fase aglutinante, lo que permite observar su forma y distribución. Las imágenes de campo oscuro resaltan defectos específicos, y las comparaciones de difracción analizan los

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tipos de dislocación. La ventaja de este método reside en su resolución a nivel atómico, combinada con el filtrado de energía para eliminar los efectos de espesor. El calentamiento in situ se utiliza para observar la dinámica de los defectos, reparando químicamente las vacantes mediante difusión a alta temperatura. El procesamiento de datos incluye el filtrado de imágenes y la simulación para confirmar el modelo del defecto.

Además, esta observación es eficaz para rastrear defectos de deformación por laminación; las muestras trabajadas en frío presentan redes de dislocaciones de alta densidad que disminuyen tras el recocido. Los defectos inducidos por impurezas, como los compuestos aciculares, pueden visualizarse para guiar el control. Se utiliza un alto vacío ambiental para evitar la contaminación por carbono. El método combina el mapeo elemental en modo de transmisión de barrido (STEM) para ampliar la información química de los defectos.

### 5.3 Especificaciones de pruebas de indicadores de rendimiento para láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno se basan principalmente en estándares nacionales, estándares de la industria y especificaciones internas de la compañía. Estas especificaciones cubren métodos para determinar parámetros clave como densidad, dureza, resistencia mecánica, conductividad térmica y conductividad eléctrica, asegurando la consistencia y confiabilidad del material en aplicaciones industriales. El proceso de prueba enfatiza la representatividad de la muestra, la calibración del instrumento y el control ambiental, como la operación en condiciones de humedad y temperatura ambiente constantes. La densidad y la densidad de empaquetamiento se miden utilizando el método de desplazamiento de agua o el método de desplazamiento de gas, mientras que la dureza se determina utilizando los métodos Brinell, Vickers o Rockwell. Las especificaciones también incluyen requisitos de repetibilidad, con valores promedio de múltiples muestras para reflejar la uniformidad. La composición química afecta las pruebas de rendimiento; se debe considerar la corrección de errores de medición cuando el contenido de tungsteno es alto. Los informes de prueba deben registrar el modelo del instrumento, el número de estándar y el análisis de desviación.

#### 5.3.1 Métodos para probar la densidad y la densidad de empaquetamiento de láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno se someten a los métodos de desplazamiento de agua y de desplazamiento de gas de Arquímedes. El primero es adecuado para laboratorios de rutina, mientras que el segundo es adecuado para muestras de alta precisión o que no son aptas para la inmersión en líquido. Este método calcula la densidad del material basándose en el principio de desplazamiento de volumen y evalúa la densidad de empaquetamiento comparándola con la densidad teórica. En el método de desplazamiento de agua, la muestra primero se seca y se pesa, luego se sumerge en agua destilada o etanol y se pesa para determinar su peso húmedo. Químicamente, el líquido debe elegirse para evitar la reacción con la aleación y prevenir la disolución de la superficie. La fórmula de cálculo tiene en cuenta la densidad del líquido y la corrección de la temperatura para garantizar una medición precisa. Cuando la forma de la muestra es regular, el

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



volumen se mide directamente; para láminas irregulares, se suspenden y se sumergen con un hilo fino. Se toman múltiples mediciones y se promedian para reducir la interferencia de las burbujas de aire.

El método de desplazamiento de gas utiliza helio o nitrógeno. La muestra se coloca en un recipiente de volumen conocido y los cambios en la presión del gas reflejan el volumen de la muestra. Los gases químicamente inertes previenen la oxidación. La ventaja de este método reside en su funcionamiento en seco, lo que lo hace adecuado para láminas delgadas o superficies fácilmente oxidables. Los cálculos de densidad requieren una referencia de densidad teórica, basada en un promedio ponderado de los componentes; cuando predomina el tungsteno, el valor teórico se aproxima al del tungsteno puro. Las especificaciones de prueba exigen muestras limpias, sin incrustaciones de aceite ni óxido, y mediciones realizadas después del pulido de la superficie. La temperatura ambiente se controla a la temperatura ambiente estándar y la humedad es baja para evitar la influencia del agua adsorbida.

Además, este método se utiliza ampliamente en la verificación de lotes de producción, con muestreo multipunto para evaluar la uniformidad y rastrear el proceso de sinterización cuando las desviaciones son importantes. La pureza química afecta los resultados; las impurezas y la porosidad reducen la densidad medida. Se utilizan bloques estándar para la calibración del instrumento y es necesaria una verificación periódica. Al analizar secciones delgadas, es necesario apilarlas o doblarlas para evitar errores de doblado. Los resultados se expresan en gramos por centímetro cúbico como porcentaje de la densidad. Las especificaciones priorizan la seguridad; para el método de desplazamiento de agua, se debe prestar atención a la evaporación del líquido, y para el método de gas, se debe verificar el sellado.

### 5.3.2 Método de prueba para la dureza de láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno incluyen pruebas de dureza Brinell, dureza Vickers y dureza Rockwell. La elección depende del espesor del material y el valor esperado. La dureza Brinell es adecuada para la dureza general, mientras que las dos últimas se utilizan para láminas superficiales o delgadas. Estos métodos evalúan la resistencia a la deformación plástica según el tamaño o la profundidad de la indentación. La prueba de dureza Brinell utiliza un penetrador de bola de acero o de carburo cementado, que se presiona en la superficie de la muestra bajo una carga específica. Después de mantenerlo durante un tiempo específico, se mide el diámetro de la indentación para calcular el valor de dureza. Químicamente, el material del penetrador debe ser resistente al desgaste para evitar rayaduras por la fase de tungsteno. La superficie de la muestra debe pulirse hasta quedar lisa y tener el espesor suficiente para evitar la deformación en el lado posterior. La selección de la carga considera la alta dureza de la aleación y normalmente es alta para producir una indentación clara.

La prueba de dureza Vickers utiliza un indentador piramidal de diamante con un amplio rango de carga, ideal para mediciones de microáreas. Las mediciones diagonales de indentación se realizan bajo microscopio, y la inercia química del diamante garantiza la precisión. Para pruebas de láminas delgadas, se utilizan cargas bajas para evitar la penetración. La prueba de dureza Rockwell es rápida, con precarga seguida de carga principal; las lecturas de diferencia de profundidad se toman directamente, y las escalas HRA o HRC son adecuadas para láminas de aleación de tungsteno. Las especificaciones exigen pruebas

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

multipunto, promediado de la distribución de la rejilla y evaluación de la uniformidad. El control de la vibración ambiental y la colocación horizontal del instrumento son esenciales.

Además, este método es eficaz para el seguimiento del rendimiento posterior al tratamiento térmico, mostrando una recuperación tras la disminución de dureza observada en muestras recocidas. La composición química afecta los resultados; una mayor proporción de la fase aglutinante resulta en una menor dureza. Los tratamientos superficiales, como los recubrimientos, deben eliminarse del sustrato antes de la medición. Se utilizan bloques estándar para la calibración y verificación periódica de los instrumentos. Se realizan pruebas de flexión y fijación de láminas delgadas para evitar efectos de borde. Los resultados se expresan en unidades HB, HV o HR, con la carga especificada. Las especificaciones priorizan la seguridad; se utiliza protección del penetrador para evitar roturas.

### 5.3.3 Métodos de ensayo para la resistencia a la corrosión de láminas de aleación de tungsteno

La resistencia a la corrosión de las láminas de aleación de tungsteno incluye pruebas de inmersión, pruebas electroquímicas y pruebas de niebla salina. Estos métodos simulan diferentes entornos corrosivos para evaluar la resistencia del material a medios ácidos, alcalinos y salinos, lo que ayuda a optimizar la protección de la superficie y el diseño de la composición. Las pruebas de inmersión son el método más básico. Las muestras se colocan en un medio corrosivo específico y se observan periódicamente los cambios de peso, la morfología de la superficie y la composición de la solución. Químicamente, se seleccionan medios como ácido sulfúrico, ácido clorhídrico o soluciones de cloruro de sodio, y la temperatura y el tiempo se establecen de acuerdo con las normas. Después de la prueba, la muestra se limpia, se mide la pérdida de peso para calcular la velocidad de corrosión y la observación metalográfica de la superficie registra las picaduras o las características de corrosión uniforme. La ventaja de este método es su simplicidad e intuitividad, lo que lo hace adecuado para estudios de comportamiento de corrosión a largo plazo.

Las pruebas electroquímicas proporcionan información sobre la corrosión dinámica, principalmente mediante curvas de polarización y análisis de espectroscopía de impedancia. La muestra actúa como electrodo de trabajo, sumergida en un electrolito dentro de un sistema de tres electrodos. El barrido de potencial registra los cambios de corriente y la densidad de corriente de corrosión se calcula mediante el método de extrapolación de Tafel. El potencial de autocorrosión refleja la estabilidad termodinámica. La espectroscopía de impedancia de CA mide la resistencia y la capacitancia interfaciales, y se ajusta un modelo de circuito equivalente para evaluar el efecto protector de la película de pasivación. Debido a la alta reactividad de la fase aglutinante en las láminas de aleación de tungsteno, la estabilidad del electrodo de referencia debe considerarse cuidadosamente durante las pruebas. Las pruebas de niebla salina simulan un entorno marino, rociando una solución de cloruro de sodio en una cámara de niebla salina neutra. Periódicamente se observa óxido o picaduras superficiales; químicamente, la penetración de iones cloruro induce corrosión localizada, y los criterios de clasificación se basan en el área de corrosión.

Las especificaciones de prueba exigen que las muestras presenten una condición superficial uniforme; se deben registrar las pruebas realizadas después del pulido o recubrimiento. El control ambiental debe

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

garantizar una temperatura y humedad constantes, evitando interferencias externas. Se deben realizar múltiples pruebas paralelas, y el valor promedio se debe utilizar para analizar estadísticamente la profundidad o la velocidad de corrosión. Los productos de corrosión se deben analizar químicamente y las fases de óxido se deben identificar mediante difracción de rayos X. Se debe utilizar una combinación de métodos, como la inmersión cualitativa, el análisis electroquímico cuantitativo y la prueba acelerada de niebla salina. Las precauciones de seguridad incluyen asegurar una ventilación adecuada de la niebla ácida y la neutralización del líquido residual.

### 5.3.4 Método de prueba para la resistencia al desgaste de láminas de aleación de tungsteno

pruebas de desgaste de pasador-disco, pruebas de desgaste de muela abrasiva y pruebas de fricción recíproca. Estos métodos simulan el comportamiento del desgaste en condiciones de fricción seca o lubricación, evalúan la pérdida de volumen y el coeficiente de fricción del material bajo tensión de contacto y ayudan a optimizar la dureza y el tratamiento de la superficie. En la prueba de desgaste de pasador-disco, la muestra se fija como un disco y se aplica una carga al pasador para girar. El calor de fricción química induce desgaste oxidativo y la tasa de desgaste se calcula registrando la pérdida de peso o la profundidad de la pista de desgaste. La carga y la velocidad de rotación son ajustables para simular diferentes condiciones de trabajo. La fricción seca resalta el desgaste adhesivo, mientras que la lubricación examina el efecto de las partículas abrasivas.

La prueba de desgaste de la muela abrasiva utiliza una muela abrasiva estándar para rectificar la superficie de la muestra, midiendo la pérdida de peso por unidad de tiempo. Químicamente, la incrustación de grano abrasivo induce desgaste por corte, adecuado para láminas de aleación de tungsteno de alta dureza. Las especificaciones de la prueba controlan el tamaño del grano y la presión de la muela abrasiva para garantizar la repetibilidad. La prueba de fricción recíproca simula un movimiento lineal, con una bola o pasador deslizándose sobre la muestra. Los sensores registran la fuerza de fricción en tiempo real y calculan el coeficiente promedio. Químicamente, la fatiga superficial provoca desconchado, y se observa la microestructura de la pista de desgaste para analizar el mecanismo. La microscopía confocal láser o la perfilometría cuantifican el volumen de la pista de desgaste. Las especificaciones de prueba exigen un pulido uniforme de la superficie de la muestra y pruebas multidireccionales para evaluar la anisotropía. El entorno debe ser controlable, considerando factores como la influencia de la humedad en el desgaste oxidativo. La limpieza química elimina los residuos de desgaste, lo que garantiza una alta precisión de pesaje. Se utiliza microscopía electrónica de barrido para analizar la superficie desgastada, y la espectroscopia de energía dispersiva identifica la película de transferencia. Se emplea una combinación de métodos, que incluyen la cuantificación de la pérdida de volumen mediante pin-disc y coeficientes dinámicos recíprocos. Las precauciones de seguridad incluyen la recolección de polvo para evitar la inhalación.

### 5.3.5 Método de ensayo para la resistencia de láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno incluyen ensayos de tracción, flexión y compresión. Estos métodos miden la resistencia a la tracción, el límite elástico y el comportamiento a la fractura del material, lo que ayuda a evaluar su

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fiabilidad mecánica y adaptabilidad al procesamiento. El ensayo de tracción es el método más utilizado. Las muestras se mecanizan en tiras estándar tipo mancuerna o rectangulares y se someten a tensión uniaxial en una máquina de ensayos universal. Se registra la curva de carga-desplazamiento, y el deslizamiento por dislocación química predomina sobre la deformación plástica. Se calculan la resistencia a la tracción y el alargamiento. Se utilizan extensómetros sin contacto para los ensayos de láminas a fin de evitar daños por sujeción. La velocidad de deformación se controla lentamente para capturar el comportamiento cuasiestático.

Las pruebas de flexión son adecuadas para láminas delgadas, aplicando cargas de flexión de tres o cuatro puntos para medir la resistencia a la flexión y la deflexión. El análisis químico evalúa la compresión superficial y la compatibilidad de la capa interna con la tensión, evaluando la unión entre capas. Las pruebas de compresión son para láminas o bloques gruesos, con compresión axial de muestras cilíndricas cortas que registran la tensión-deformación. Las láminas de aleación de tungsteno presentan una plasticidad limitada a altas densidades. Las especificaciones de prueba requieren dimensiones de muestra estandarizadas y una superficie sin defectos. La temperatura ambiente es ajustable para examinar la pérdida de resistencia a alta temperatura. La propagación de grietas se monitorea en tiempo real durante la prueba, con la ayuda de emisión acústica. El análisis químico de la superficie de la fractura y la observación mediante microscopía electrónica de barrido de hoyuelos o características de clivaje diferencian los modos de fractura.



CTIA GROUP LTD Láminas de aleación de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Capítulo seis: Proceso de preparación de láminas de aleación de tungsteno

### 6.1 Proceso de preparación y clasificación de láminas de aleación de tungsteno

Las láminas de aleación de tungsteno se basan principalmente en la pulvimetalurgia. Este proceso implica múltiples operaciones unitarias, desde el polvo de materia prima hasta la lámina terminada, incluyendo la mezcla del polvo, el prensado, la sinterización, el procesamiento termomecánico y el postratamiento. La clasificación se basa en el sistema de aleación, las propiedades deseadas y las especificaciones de espesor. La principal vía de preparación se centra en la sinterización en fase líquida, complementada con variantes de sinterización en fase sólida o activada. El diseño del proceso considera las características refractarias y de alta densidad del tungsteno para garantizar la densificación y una microestructura uniforme. Un proceso típico comienza con la mezcla uniforme de polvo de tungsteno de alta pureza y polvo aglutinante, seguido del prensado isostático en frío para formar una palanquilla, la sinterización a alta temperatura para lograr la reorganización y unión de las partículas, y posteriormente el adelgazamiento gradual mediante laminación en caliente, laminación en tibio y laminación en frío, con recocido intermedio para liberar tensiones y, finalmente, el acabado superficial. En cuanto a la clasificación, las láminas de alta densidad se caracterizan por el contenido y la densidad de tungsteno, mientras que las láminas de baja densidad pueden presentar pseudoaleaciones o estructuras compuestas. El rango de espesor afecta la selección del proceso; las láminas delgadas requieren un laminado de precisión, mientras que las láminas gruesas se centran en el troquelado inicial.

La flexibilidad del proceso de preparación permite ajustes según la aplicación; por ejemplo, las láminas de protección médica priorizan la uniformidad, mientras que las láminas industriales resistentes al desgaste priorizan el refuerzo de la fase dura. Los principios químicos permean todo el proceso: la humectación en fase líquida impulsa la densificación durante la sinterización, y la coordinación de la deformación durante el procesamiento depende de la plasticidad de la fase aglutinante. El control ambiental, como el uso de una atmósfera de hidrógeno para prevenir la oxidación, y la gestión de la pureza para evitar la introducción de defectos por impurezas, son cruciales. La optimización del proceso, en particular la integración del prensado isostático en caliente y la sinterización por plasma de chispa en los últimos años, mejora la calidad de las piezas iniciales y reduce la dificultad del procesamiento posterior. La clasificación también puede basarse en el método de sinterización: sinterización tradicional en horno de hidrógeno y sinterización al vacío. La primera es más económica, mientras que la segunda ofrece un control superior de las impurezas.

#### 6.1.1 Ruta principal de preparación de láminas de aleación de tungsteno

tungsteno se basan en la pulvimetalurgia y se dividen en tres tipos: sinterización tradicional en fase líquida, sinterización activada y rutas de compuestos por infiltración de masa fundida. Estas rutas se seleccionan según el sistema de aleación y los objetivos de rendimiento para garantizar una transformación completa de polvo a lámina. La sinterización tradicional en fase líquida es el método más consolidado. Primero, el polvo de tungsteno se mezcla mecánicamente o se muele en molino de bolas con polvo de níquel, hierro o cobre en una proporción específica. A continuación, la mezcla se prensa

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

isostáticamente en frío para formar una palanquilla de gran tamaño. Posteriormente, bajo protección de hidrógeno, la temperatura se eleva por encima de la temperatura de emergencia de la fase líquida y se mantiene para promover la fusión y humectación de la fase aglutinante y la densificación de las partículas de tungsteno, logrando así la reorganización y la disolución-reprecipitación. Tras la sinterización, la palanquilla se forja a alta temperatura o se lamina en caliente para reducir gradualmente su espesor a un nivel intermedio, y luego se somete a laminación en caliente y laminación en frío, acompañados de múltiples procesos de recocido al vacío para aliviar la tensión. Finalmente, se decapa o pule para formar láminas.

La ruta de sinterización activada está diseñada para sistemas difíciles de densificar. Se preagrega al polvo una pequeña cantidad de activadores, como paladio y níquel, para reducir la temperatura de sinterización y promover la difusión en fase sólida. Químicamente, los activadores se aglomeran en la interfaz, reduciendo la energía superficial. Esta ruta es adecuada para láminas de tungsteno-cobre o con alto contenido de tungsteno. Sus ventajas incluyen un bajo consumo de energía y una microestructura refinada, pero los residuos del activador requieren un tratamiento posterior. La ruta de compuestos por infiltración en fundido primero prensa y sinteriza una estructura porosa de tungsteno, luego infiltra al vacío cobre o plata líquida. Químicamente, el metal líquido llena los poros, formando una estructura de pseudoaleación. El laminado posterior facilita el ultrafino, lo que la hace adecuada para láminas térmica y eléctricamente conductoras.

La selección de la ruta de producción considera la escalabilidad y el costo. Las rutas tradicionales son adecuadas para la producción en masa de sistemas de níquel-hierro y níquel-cobre, mientras que las rutas de infiltración de material fundido están diseñadas para series de tungsteno-cobre. Procesos auxiliares como el prensado isostático en caliente se pueden incorporar en cualquier ruta para mejorar la densidad inicial y reducir las grietas por laminación. El control químico se implementa en toda la ruta, la gestión del punto de rocío atmosférico previene la oxidación y la igualación del tamaño de las partículas de polvo afecta la uniformidad de la mezcla. Tratamientos superficiales como el recubrimiento químico se integran en los extremos de la ruta para mejorar la resistencia a la corrosión. Debido a factores ambientales, los materiales de desecho reciclados se pulverizan y reutilizan.

#### **6.1.2 Diferencias de proceso entre láminas de aleación de tungsteno de alta densidad y láminas que no son de alta densidad**

alta densidad y las láminas de baja densidad se diferencian en el diseño de la composición, los parámetros de sinterización y las rutas de procesamiento. El primero busca maximizar el contenido y la densidad de tungsteno, mientras que el segundo se centra en funciones específicas como la conductividad térmica o el equilibrio de baja densidad. Las láminas de alta densidad suelen tener un mayor contenido de tungsteno y una menor proporción de fase aglutinante. El proceso emplea un mantenimiento prolongado en fase líquida y un prensado isostático secundario en caliente para minimizar la porosidad y reducir químicamente el volumen de la fase blanda para aproximarse a la densidad teórica. La temperatura de sinterización se controla con precisión dentro del rango adecuado de la fase líquida para evitar un flujo excesivo que provoque colapso. El proceso de procesamiento enfatiza el laminado en caliente de alta

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

reducción seguido de un recocido intermedio riguroso para mantener una microestructura uniforme y una alta uniformidad de espesor en el producto terminado.

Para materiales de láminas de baja densidad, como las pseudoaleaciones de tungsteno y cobre, se puede reducir el contenido de tungsteno y el proceso pasa a la infiltración por fusión. Primero, se sinteriza la estructura de tungsteno, dejando una porosidad intencional, y luego se infiltra cobre para rellenar los huecos. Químicamente, la fase de cobre no forma una solución sólida, lo que proporciona un canal de alta conductividad térmica. La temperatura de sinterización es menor y el proceso se centra más en la adaptabilidad al laminado en frío. Gracias a la buena plasticidad del cobre, es fácil lograr un espesor ultrafino sin necesidad de recocidos frecuentes. Las variantes de sinterización activada son comunes en láminas de baja densidad, con aditivos que promueven la densificación a baja temperatura, adecuadas para sistemas de tungsteno-plata o compuestos. Las diferencias también radican en el tratamiento superficial; las láminas de alta densidad suelen estar niqueladas para proteger la fase aglutinante, mientras que las láminas de baja densidad utilizan directamente la resistencia a la corrosión del cobre.

Además, las diferencias en los procesos afectan el consumo de energía y el rendimiento. Los procesos de alta densidad requieren equipos sofisticados y plazos de entrega largos, pero ofrecen un rendimiento estable; los procesos de baja densidad son más flexibles y adecuados para la producción de obleas funcionales en lotes pequeños. La gestión de la pureza química es más estricta en los procesos de alta densidad, ya que las impurezas pueden aumentar fácilmente la porosidad. En cuanto al control ambiental, los procesos de alta densidad requieren hidrógeno de alta pureza, mientras que los procesos de baja densidad utilizan la infiltración por fusión al vacío para prevenir la oxidación.

### 6.1.3 Rango de espesor típico y selección del proceso correspondiente (0,05 mm a 50 mm)

Las láminas de aleación de tungsteno suelen tener un espesor que va desde una lámina ultrafina de 0,05 mm hasta placas de 50 mm. La selección del proceso correspondiente requiere un equilibrio entre la dificultad del procesamiento y el control de la microestructura. Las láminas delgadas priorizan el laminado de precisión, mientras que las gruesas se centran en la preparación de palanquillas y el forjado. Para el rango ultrafino de 0,05 mm a 0,5 mm, el laminado en frío multipaso es el proceso principal, lo que resulta en un alto rendimiento general del procesamiento. Se utiliza un ligero aumento en la proporción de la fase aglutinante para mejorar la ductilidad y prevenir grietas en los bordes. El recocido intermedio se realiza frecuentemente al alto vacío para liberar tensiones, y se utilizan lubricantes para reducir el daño superficial. Finalmente, el pulido químico o el acabado electrolítico garantizan una superficie lisa.

El proceso alcanza su máximo desarrollo para placas con un espesor de 0,5 mm a 10 mm, desde el laminado en caliente hasta el acabado por laminado en frío. El laminado en caliente implica grandes reducciones en cada pasada, con transiciones de laminado en caliente y procesos de recocido optimizados que dan como resultado una microestructura fibrosa. Para placas con un espesor de 10 mm a 50 mm, el proceso se centra en el conformado inicial, seguido del forjado o laminado en caliente para obtener tochos delgados de gran tamaño prensados isostáticamente en frío. Se utiliza una atmósfera protectora a alta

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperatura para evitar la descarburación, y la velocidad de mecanizado es menor para conservar la resistencia. La superficie se elimina principalmente mediante fresado para eliminar la capa de óxido.

La selección del proceso considera las capacidades del equipo: las láminas delgadas requieren trenes de laminación de alta precisión y control de tensión, mientras que las láminas gruesas requieren grandes prensas de forja. Los principios químicos se reflejan en el espesor: las láminas delgadas disipan el calor rápidamente y presentan un endurecimiento por acritud significativo; las láminas gruesas experimentan efectos térmicos acumulados, lo que requiere control del gradiente de temperatura. La gestión de la uniformidad se vuelve cada vez más difícil con el espesor, lo que requiere pruebas de densidad multipunto para láminas gruesas. Los factores ambientales también influyen; las láminas delgadas son propensas a la oxidación y requieren un envasado con gas inerte.

## 6.2 Preparación de materia prima en polvo

La preparación del polvo de materia prima es un paso fundamental en la producción de láminas de aleación de tungsteno, que afecta directamente la uniformidad, la densidad y las propiedades finales de la estructura sinterizada. Esta preparación implica la reducción y purificación del polvo de tungsteno, la selección y el pretratamiento de los polvos de elementos de aleación, y la homogeneización mediante mezcla. El polvo de tungsteno, como materia prima principal, requiere una alta pureza y un tamaño de partícula adecuado para garantizar la humectación y la reorganización durante la sinterización en fase líquida. Los polvos de elementos de aleación, como el níquel, el hierro y el cobre, proporcionan una fase aglutinante y deben coincidir con el tamaño de partícula y la actividad del polvo de tungsteno. El proceso de preparación prioriza el control de la pureza química y las propiedades físicas para evitar la introducción de impurezas en las fases frágiles o los poros. Un proceso típico comienza con la reducción de tungstato de amonio con hidrógeno, progresando a la atomización del polvo de aleación o la descomposición del carbonilo, seguida del tamizado y la mezcla para lograr una dosificación uniforme. La distribución del tamaño de partícula y la detección mediante el método de tamiz de Fisher son puntos clave del control de calidad para garantizar la fluidez del polvo y el rendimiento del prensado.

El principio químico de la preparación se basa en reacciones de reducción y regulación de la energía superficial. Se utiliza hidrógeno de alta pureza para reducir y eliminar el oxígeno, y el polvo de aleación se pretrata para prevenir la oxidación. Los procesos modernos incorporan secado por aspersión o aleación mecánica para mejorar la eficiencia de la mezcla y refinar la microestructura. Debido a factores ambientales, el polvo debe almacenarse en una atmósfera seca e inerte para evitar la absorción de humedad. La calidad de las materias primas afecta directamente la uniformidad del espesor del producto final y la tasa de defectos; el polvo fino es beneficioso para la producción de láminas delgadas, mientras que el polvo grueso es adecuado para placas gruesas.

### 6.2.1 Preparación y requisitos de calidad del polvo de tungsteno de alta pureza

La preparación de polvo de tungsteno de alta pureza se basa principalmente en la reducción por hidrógeno del tungstato de amonio o del óxido de tungsteno. Esta reducción multietapa logra una alta purificación

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



y control del tamaño de partícula del tungsteno, garantizando así su actividad y pureza durante la sinterización de láminas de aleación. El proceso de preparación comienza con la disolución y recristalización del tungstato de amonio, seguida de la calcinación para producir tungsteno amarillo u óxido de tungsteno azul. Posteriormente, se somete a una reducción por hidrógeno en etapas en un horno tubular o de empuje. La primera etapa consiste en la reducción a baja temperatura para eliminar el agua de cristalización y parte del oxígeno, mientras que la segunda etapa consiste en la reducción a alta temperatura para producir polvo de tungsteno metálico. Químicamente, la reacción de reducción implica la reacción de  $WO_3$  con  $H_2$  para producir  $W$  y  $H_2O$ . El vapor de agua se elimina rápidamente mediante el control del punto de rocío para evitar la reoxidación del polvo de tungsteno. Parámetros del proceso como la velocidad de la nave, el caudal de hidrógeno y el gradiente de temperatura regulan el tamaño de partícula del polvo; temperaturas y velocidades más bajas favorecen la formación de un polvo más fino.

Los requisitos de calidad se centran en la pureza, el tamaño de partícula y la morfología. La pureza requiere un bajo contenido de oxígeno y trazas de metales alcalinos y fósforo/azufre para evitar defectos de sinterización. El tamaño de partícula se determina típicamente utilizando el método Fisher; el polvo fino promueve la densificación, mientras que el polvo grueso proporciona resistencia. La morfología requiere formas casi esféricas o poliédricas con superficies limpias y aglomeradas para facilitar la mezcla y el flujo. Las pruebas incluyen análisis químico de impurezas, observación de la morfología mediante microscopía electrónica de barrido y análisis de la distribución del tamaño de partícula por láser. Durante la preparación, el tungstato de amonio, materia prima, se somete a múltiples recristalizaciones para eliminar el sodio y el calcio, y se seca con hidrógeno de alta pureza. Se utilizan procesos variantes como la reducción por plasma o la fusión de zinc para recuperar el tungsteno, lo que mejora aún más la pureza.

Los requisitos de calidad para esta preparación están relacionados con la aplicación de la lámina de aleación. Las láminas de blindaje médico requieren un nivel extremadamente bajo de impurezas para evitar la dispersión de la radiación, mientras que las láminas industriales resistentes al desgaste permiten granos ligeramente más gruesos para mejorar la dureza. El almacenamiento requiere envasado al vacío o en gas inerte para evitar la humedad y la oxidación. La estabilidad química es un requisito fundamental; el polvo es propenso a la pasivación en contacto con el aire, formando una fina capa de óxido que afecta la humectación, lo que requiere una activación prerreductora.

### 6.2.2 Selección y pretratamiento de polvos de elementos de aleación (Ni, Fe, Cu, Co, Mo, etc.)

Los polvos de elementos de aleación, como níquel, hierro, cobre, cobalto y molibdeno, son cruciales para la formulación de láminas de aleación de tungsteno. La selección de los elementos se basa en la humectabilidad del diagrama de fases y la correspondencia funcional, mientras que el pretratamiento garantiza la actividad y pureza del polvo, evitando una sinterización desigual. El polvo de níquel se prepara comúnmente mediante descomposición carbonílica, lo que resulta en un tamaño de partícula fino, alta actividad y buena ductilidad; el polvo de hierro se prepara por electrólisis o reducción, ofreciendo propiedades magnéticas moderadas que facilitan la mezcla; el polvo de cobre se prepara por atomización o electrólisis, proporcionando una excelente conductividad térmica para sistemas no magnéticos; el polvo de cobalto refuerza la fase aglutinante; y el polvo de molibdeno reemplaza parcialmente al tungsteno

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

para regular la expansión. Los criterios de selección incluyen alta pureza, bajo contenido de oxígeno y correspondencia del tamaño de partícula con el polvo de tungsteno, generalmente con tamaños de partícula Fisher similares para evitar la segregación.

El pretratamiento incluye la reducción con hidrógeno para eliminar la capa de óxido superficial; químicamente, el  $H_2$  reacciona con los óxidos para generar agua, que posteriormente se descarga, aumentando así el ángulo de humectación. La desgasificación al vacío reduce aún más las impurezas gaseosas, y el tamizado elimina los aglomerados y las materias extrañas. La molienda con bolas o la activación mecánica prealean ciertos elementos, como la premezcla de níquel-hierro, para formar un polvo de solución sólida, lo que mejora la uniformidad. La temperatura de procesamiento se controla cuidadosamente para evitar la sinterización del polvo. La limpieza química, como el lavado con ácido, elimina las manchas de aceite, pero los polvos de aleación de tungsteno suelen tratarse con métodos secos para prevenir la corrosión.

Además, las diferencias en la selección y el pretratamiento reflejan los requisitos del sistema: el polvo de hierro en el sistema níquel-hierro requiere protección contra la oxidación, mientras que el polvo de cobre en el sistema níquel-cobre presenta una alta resistencia a la oxidación. Se selecciona polvo de molibdeno de alta pureza para la atomización, a fin de igualar la densidad del tungsteno. Las pruebas de calidad incluyen análisis químicos de oxígeno, carbono y distribución granulométrica.

### 6.2.3 Control de la distribución del tamaño de partículas de polvo y detección del tamaño de partículas de Fisher

Los métodos principales de control de calidad en la preparación de materias primas de láminas de aleación de tungsteno. La optimización de la distribución se logra ajustando los parámetros de reducción y el tamizado, mientras que el método Fisher proporciona una evaluación del tamaño promedio de partícula para garantizar el rendimiento de prensado y sinterización. El control de la distribución del tamaño de partícula se refleja en la reducción del polvo de tungsteno; las altas temperaturas y las velocidades rápidas del barco producen polvo grueso, mientras que las bajas temperaturas y las velocidades lentas producen polvo fino. Químicamente, la cinética de reducción afecta el crecimiento del núcleo cristalino, y el ajuste del caudal de hidrógeno y la concentración de vapor de agua suprime el engrosamiento anormal. La atomización o molienda del polvo de aleación controla el estrechamiento de la distribución, evitando la aglomeración causada por polvo extremadamente fino o la porosidad causada por polvo grueso. Los analizadores de tamaño de partícula láser o los métodos de tamizado monitorean la curva de distribución; idealmente, debe ser logarítmica normal, con una distribución amplia que facilite el estrechamiento y la densificación.

La distribución del tamaño de partícula de Fisher se basa en el principio de permeación del aire. La resistencia de la capa de polvo refleja el tamaño promedio de partícula, y la adsorción química superficial de gases afecta la permeación, pero la repetibilidad es buena en condiciones estándar. La muestra de prueba se seca y se compacta uniformemente, y el diámetro subtamiz se calcula en función de la diferencia de presión. El método es simple y rápido, adecuado para el control de producción y cubre un

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rango típico de polvo de tungsteno, desde fino hasta grueso, para cumplir con los requisitos de espesor. El control se combina con ajustes de mezcla; el polvo de tungsteno fino se mezcla con polvo de aleación grueso para optimizar el flujo.

Este control y detección están relacionados con la uniformidad del producto terminado; una distribución estrecha favorece la obtención de láminas delgadas sin defectos, mientras que una distribución amplia resulta en láminas gruesas de alta resistencia. La pureza química afecta la detección; los altos niveles de oxígeno y la aglomeración de polvo producen lecturas más altas. El control de la humedad ambiental es crucial para evitar que la muestra absorba agua.

#### 6.2.4 Métodos de mezcla y aleación de polvos

La mezcla y aleación de polvos son pasos de homogeneización en la preparación de láminas de aleación de tungsteno. La distribución uniforme de los elementos se logra mediante mezcla mecánica, molienda de bolas o secado por aspersión para evitar la segregación por sinterización. La mezcla mecánica suele utilizar mezcladores de tipo V o de doble cono con rotación a baja velocidad para evitar la separación. Químicamente, las fuerzas electrostáticas o de van der Waals sobre la superficie del polvo afectan la uniformidad, y aditivos como el alcohol facilitan la dispersión. El tiempo de mezcla puede extenderse a varias horas para asegurar una mezcla aleatoria. La aleación mediante molienda de bolas utiliza un proceso de alta energía, donde el impacto induce reacciones mecanoquímicas, prealeando algunos elementos, refinando el tamaño de las partículas y mejorando la actividad. Sin embargo, se requiere protección con gas inerte para evitar la oxidación.

El secado por aspersión atomiza y seca una suspensión de polvo en partículas esféricas, uniéndolas temporalmente con un aglutinante químico para mejorar la fluidez y la compresibilidad. La ventaja de este método reside en la uniformidad del polvo compuesto, lo que lo hace adecuado para la producción a gran escala. Tras la mezcla, se toman muestras para análisis químico o microscopía electrónica a fin de verificar la distribución; la uniformidad se define por una baja desviación elemental.

Las diferencias entre estos métodos reflejan la escala de producción: la mezcla mecánica es sencilla y económica, la molienda de bolas es adecuada para refinar microestructuras y el secado por aspersión logra una uniformidad de alta calidad. Los principios químicos implican difusión y adsorción, y la mezcla promueve el contacto superficial. El almacenamiento es crucial para prevenir la separación, y se debe evitar la vibración.

#### 6.3 Proceso de moldeo de polvo

El moldeo de polvo es un paso crucial en la producción de láminas de aleación de tungsteno, ya que conecta el polvo bruto con las piezas sinterizadas. Transforma el polvo suelto en piezas en bruto con una forma, resistencia y densidad específicas mediante la aplicación de presión o el uso de medios auxiliares. Este proceso influye directamente en la uniformidad de la contracción durante la sinterización posterior y en la consistencia de la microestructura del producto final. Los métodos de moldeo incluyen el prensado

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

isostático en frío, el moldeo por compresión y el moldeo por inyección, seleccionados en función de las características del polvo, el tamaño de la pieza y el espesor deseado. Los polvos de aleación de tungsteno presentan baja fluidez y compresibilidad, lo que requiere considerar la alta densidad del tungsteno y el efecto humectante de la fase aglutinante durante el moldeo. Los principios del proceso incluyen la reorganización de partículas, la deformación plástica y los efectos de fricción; la uniformidad de la distribución de la presión determina el gradiente de densidad de la pieza en bruto. Es necesaria una resistencia suficiente de la pieza en bruto para facilitar su manipulación y desaglomeración, evitando así el agrietamiento o la deformación. Los aditivos químicos, como la parafina o los polímeros, refuerzan temporalmente la unión y se eliminan posteriormente.

En los últimos años, la optimización de los procesos de moldeo se ha centrado en la ecologización y la automatización. El prensado isostático en frío es adecuado para piezas en bruto de gran tamaño, el moldeo por compresión es adecuado para piezas pequeñas y medianas, y el moldeo por inyección se ha extendido a piezas en bruto delgadas de formas complejas. El control ambiental, como una atmósfera seca para prevenir la oxidación del polvo y una liberación lenta de presión para evitar la recuperación elástica, es crucial. La densidad de la pieza en bruto verde después del moldeo suele ser un porcentaje del valor teórico, y la optimización puede reducir las diferencias en la contracción de sinterización. El control de defectos se centra en la delaminación y la falta de homogeneidad de la densidad, que se mitigan mediante el ajuste de los parámetros del proceso.

### 6.3.1 Prensado isostático en frío

El prensado isostático en frío (COP) es un método para preparar piezas brutas de aleación de tungsteno. Utiliza un medio líquido para transmitir una presión uniforme, comprimiendo el polvo en un molde flexible para formar una pieza bruta de alta densidad. Este método es adecuado para piezas brutas de gran tamaño o formas complejas, garantizando una presión isotrópica. El proceso consiste en llenar un molde de caucho o plástico con la mezcla de polvo, sellarlo y colocarlo en un recipiente de alta presión. Se utiliza agua o aceite como medio transmisor de presión, y la presión se incrementa gradualmente hasta el nivel deseado. Tras mantener esta presión durante un tiempo, la pieza bruta se despresuriza y se retira. Químicamente, la presión uniforme promueve la reorganización compacta de las partículas, reduciendo los gradientes de densidad causados por la fricción. La alta dureza del polvo de tungsteno rellena eficazmente los huecos bajo prensado isostático, y el polvo de fase aglutinante facilita una deformación coordinada.

Las ventajas de este proceso de moldeo residen en la distribución uniforme de la densidad de la pieza en bruto, lo que la hace adecuada para el laminado posterior de láminas y evita las zonas de baja densidad en los bordes, comunes en el moldeo. El diseño flexible de la matriz permite la producción de piezas en bruto cilíndricas, con forma de placa o irregulares, y la adición de una pequeña cantidad de lubricante mejora el flujo de llenado. El control lento de la liberación de presión previene las microfisuras causadas por el rebote elástico. La resistencia de la pieza en bruto se mejora mediante la igualación del tamaño de las partículas de polvo; los polvos más finos ofrecen buenas propiedades de llenado, pero requieren protección contra la aglomeración. La optimización de los parámetros del proceso implica la tasa de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



presurización y el tiempo de retención; los tiempos de retención más prolongados promueven el bloqueo de las partículas.

Este proceso de conformado se utiliza ampliamente en la producción de láminas de aleación de tungsteno de alta densidad. Tras el prensado isostático en frío, las palanquillas de gran tamaño alcanzan una alta eficiencia en el laminado en caliente. La gestión de la pureza química es crucial; un medio limpio es esencial para evitar la contaminación. La superficie verde de la palanquilla queda lisa tras el desmoldeo, lo que reduce las sobras del mecanizado posterior. Variantes como el método de bolsa seca simplifican las operaciones, mientras que el método de bolsa húmeda ofrece mayor flexibilidad. Debido a factores ambientales, el reciclaje de los materiales del molde reduce los costes.

### 6.3.2 Moldeo por compresión y optimización de parámetros de presión

El moldeo por compresión y la optimización de los parámetros de presión son métodos tradicionales para producir piezas brutas de pequeño tamaño de láminas de aleación de tungsteno. Este método consiste en comprimir el polvo para darle forma mediante presión unidireccional o bidireccional aplicada a través de un molde de acero. El equipo es sencillo, lo que lo hace adecuado para la producción en masa. La optimización se centra en la distribución de la presión y un desmoldeo suave. El proceso consiste en llenar un molde duro con polvo, aplicar presión con una prensa hidráulica y provocar que las partículas se reorganicen y deformen por fricción contra la pared del molde, formando una pieza bruta. Químicamente, el polvo de tungsteno tiene una compresibilidad limitada; la adición de aglutinantes temporales, como la parafina, refuerza la unión entre partículas y mejora la resistencia de la pieza bruta. La compresión unidireccional requiere lubricar la pared del molde para reducir la fricción, mientras que la compresión bidireccional mejora la uniformidad de la densidad.

La optimización de los parámetros de presión implica la magnitud de la carga, la tasa de presurización y el tiempo de mantenimiento. Una presión alta aumenta la densidad, pero es propensa a la delaminación, mientras que una presión baja produce mayor porosidad. La optimización se determina experimentalmente, con una presurización gradual para evitar la concentración de tensiones. Los agentes desmoldantes, como los recubrimientos químicos de estearato de zinc, reducen la fricción y previenen la adherencia. Los gradientes de densidad en verde se mitigan mediante matrices flotantes o diseños multipunzón. Chapas de aleación de tungsteno de espesor estándar, seguidas de forjado o laminado de las piezas más pequeñas. Las proporciones optimizadas de aditivos químicos equilibran la resistencia y un desengrasado exhaustivo. El control gradual de la liberación de presión reduce el agrietamiento por recuperación elástica. Variaciones como el prensado en caliente mejoran la fluidez, pero las aleaciones de tungsteno se procesan normalmente a temperatura ambiente. El control ambiental garantiza que el polvo permanezca seco para evitar la absorción de humedad.

### 6.3.3 Aplicación del moldeo por inyección en preformas de láminas delgadas

El moldeo por inyección se utiliza en la producción de preformas de láminas delgadas. El polvo de aleación de tungsteno se mezcla con un aglutinante orgánico para formar una materia prima, que

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

posteriormente se inyecta a alta presión en un molde para formar piezas en bruto complejas o de paredes delgadas. Este método amplía la libertad de forma de la pulvimetalurgia y es adecuado para el preformado de láminas delgadas de precisión. El proceso comienza con la preparación de la materia prima. El polvo se mezcla con un aglutinante a base de cera o polímero a alta temperatura, y el aglutinante encapsula químicamente las partículas para mejorar la fluidez. Tras la granulación, la materia prima se inyecta en un molde calentado, donde la presión la empuja para llenar la cavidad. El enfriamiento y la solidificación desmoldan la pieza en bruto. El desengrasado químico elimina el aglutinante, mientras que el desengrasado con disolventes o térmico descompone la materia orgánica, dejando una preforma porosa que posteriormente se sinteriza para lograr densidad.

Las ventajas de esta aplicación residen en el conformado casi en su forma final, el espesor uniforme de la lámina delgada y la superficie lisa, lo que reduce el mecanizado. La alimentación con alta carga de tungsteno requiere una viscosidad optimizada para evitar la segregación. Los parámetros de inyección, como la temperatura y la presión, deben coincidir con las características del polvo, y un diseño preciso del molde es esencial para controlar el espesor de la pared.

Esta aplicación presenta un gran potencial en preformas de láminas ultrafinas de aleación de tungsteno, lo que permite la formación de formas complejas, como láminas perforadas. El aglutinante químico se selecciona con bajo contenido de carbono residual para evitar la fragilización del carburo. El desaglomerante lento previene la formación de ampollas y grietas. La contracción posterior de la sinterización es controlable. El aglutinante es reciclable ambientalmente, lo que reduce la contaminación.

#### 6.3.4 Proceso de mejora de la resistencia de la carrocería verde y desengrasado

Mejorar la resistencia del cuerpo verde y el desaglomerado son procesos cruciales posteriores al moldeo. La resistencia del cuerpo verde se mejora mediante aditivos o presinterización, mientras que el desaglomerado elimina los aglutinantes temporales para garantizar una sinterización posterior sin defectos. Los métodos para mejorar la resistencia incluyen el aumento de la proporción de aglutinante o la presinterización a baja temperatura, la unión química de las partículas de aglutinante y una ligera difusión durante la presinterización para formar uniones en el cuello. La resistencia del cuerpo verde moldeado depende de la presión, mientras que las materias primas moldeadas por inyección tienen una alta resistencia inherente.

Los procesos de desengrase se dividen en desengrase con disolventes y desengrase térmico. El desengrase con disolventes implica la inmersión del material en un disolvente orgánico para disolver la base de cera, mientras que el desengrase térmico descompone el polímero mediante calentamiento. El control químico de la velocidad de calentamiento evita la vaporización y el burbujeo rápidos. Un proceso de desengrase combinado, con disolvente y calor, es altamente eficiente y deja pocos residuos. Los parámetros optimizados del proceso previenen el agrietamiento y los materiales de soporte ayudan en la preparación del tocho. Este proceso es particularmente importante en tochos moldeados por inyección; un desengrasado exhaustivo afecta la pureza de la sinterización. Se debe lograr un equilibrio entre la mejora de la resistencia y el desengrasado; una unión excesivamente fuerte dificulta el desengrasado. El análisis

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

químico del carbono residual monitorea el efecto desengrasante. Los disolventes se recuperan mediante el tratamiento de gases residuales ambientales.

#### 6.4 Proceso de sinterización

La sinterización es la etapa central en la preparación de láminas de aleación de tungsteno. Mediante un tratamiento a alta temperatura, el tocho verde formado se transforma en un material a granel de alta densidad, eliminando la porosidad y formando una microestructura bifásica estable. Este proceso determina directamente la densidad del material, la distribución de fases y la resistencia de la unión interfacial. Los métodos de sinterización incluyen la sinterización vertical en atmósfera de hidrógeno, la sinterización al vacío y la sinterización integrada con prensado isostático en caliente (HIP). La sinterización de hidrógeno es adecuada para sistemas tradicionales de fase líquida, la sinterización al vacío se centra en el control de impurezas y los procesos integrados mejoran la calidad de los tochos complejos. Los principios del proceso incluyen difusión en fase sólida, reordenamiento en fase líquida y mecanismos de disolución-reprecipitación. Las partículas de tungsteno se esferoidizan bajo la humectación de la fase aglutinante, mejorando la unión química interfacial. Los parámetros de temperatura, atmósfera y mantenimiento deben coincidir con precisión con el sistema de aleación para evitar la sinterización excesiva (engrosamiento) o insuficiente (porosidad).

En los últimos años, la optimización de la sinterización ha incorporado hornos continuos y control inteligente para mejorar la uniformidad y la eficiencia energética. La atmósfera química desempeña un papel fundamental, ya que el hidrógeno reduce los óxidos y el vacío elimina las impurezas volátiles. El método de carga de las palanquillas afecta el campo de temperatura; la suspensión vertical o la carga en barcaza reducen la deformación. La velocidad de enfriamiento regula las fases precipitadas, y el enfriamiento lento promueve la uniformidad. La prevención de defectos se centra en la formación de ampollas y grietas, mitigadas mediante la predegasificación y el calentamiento por gradiente.

##### 6.4.1 Tecnología de sinterización vertical en atmósfera de hidrógeno

La sinterización vertical en atmósfera de hidrógeno es un método clásico para la densificación de palanquillas de aleación de tungsteno. El calentamiento en un horno protegido con hidrógeno bajo una naveta de molibdeno o en estado suspendido logra la sinterización en fase líquida y la reducción de impurezas. Esta tecnología es adecuada para la producción en masa de sistemas de níquel-hierro y níquel-cobre. El proceso consiste en colocar la palanquilla verde verticalmente o en una naveta, con un flujo continuo de hidrógeno. La temperatura se eleva por encima de la temperatura de liquidus y se mantiene, permitiendo que la reacción de reducción elimine los óxidos superficiales, mientras que el vapor de agua se expulsa con el flujo de gas. Químicamente, el hidrógeno reacciona con el oxígeno para producir agua, manteniendo la palanquilla limpia, promoviendo la humectación de las partículas de tungsteno por la fase aglutinante y facilitando la reorganización y la densificación. La disposición vertical reduce el contacto entre la palanquilla y la naveta, evitando la adhesión y la contaminación localizada.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La ventaja tecnológica reside en el doble efecto de la atmósfera reductora, que reduce las impurezas a la vez que protege contra la oxidación y volatilización del tungsteno. Los hornos suelen ser de tipo continuo de empuje o de campana; los primeros ofrecen un alto grado de automatización, mientras que los segundos proporcionan una temperatura más uniforme. La curva de calentamiento está segmentada: la desgasificación a baja temperatura elimina el aglutinante residual, la difusión en fase sólida a temperatura media y el mantenimiento en fase líquida a alta temperatura. Durante el período de mantenimiento, las partículas de tungsteno se esferoidizan y el mecanismo de disolución-reprecipitación refina la interfaz. El enfriamiento se controla a la velocidad del hidrógeno para evitar el agrietamiento por tensión térmica.

Esta tecnología se aplica con éxito en la sinterización de láminas de aleación de tungsteno de alta densidad. La gestión rigurosa del punto de rocío de hidrógeno garantiza una reducción suficiente a puntos de rocío bajos y evita la sobrerreducción a puntos de rocío altos. El espaciado optimizado de las palanquillas garantiza un flujo de aire uniforme y reduce los gradientes de temperatura. La pureza química se mejora mediante la filtración de hidrógeno multietapa. Variantes como el hidrógeno húmedo controlan la humedad y promueven la eliminación de oxígeno. El tratamiento de gases residuales ambientales neutraliza la humedad.

#### 6.4.2 Control de la ventana de temperatura de sinterización en fase líquida y tiempo de retención

El control de la ventana de temperatura de sinterización en fase líquida y el tiempo de mantenimiento es un parámetro fundamental en el proceso de sinterización de láminas de aleación de tungsteno, que afecta directamente la cantidad de fase líquida, la reorganización de las partículas y la evolución de la microestructura. Este control garantiza una densificación suficiente, evitando crecimientos anormales. La ventana de temperatura se encuentra por encima del punto de fusión de la fase aglutinante. Tras la aparición de la fase líquida, una cantidad adecuada fluye y humedece las partículas de tungsteno, y la energía superficial reducida a nivel químico impulsa la reorganización, disolviendo las partículas pequeñas y precipitándolas sobre la superficie de las partículas más grandes. Una ventana estrecha da como resultado una fase líquida insuficiente y una baja densidad si es demasiado baja, mientras que una fase líquida excesiva provoca el colapso o la segregación del cuerpo verde. La ventana es mayor en los sistemas de níquel-hierro y menor en los de níquel-cobre, lo que requiere un ajuste según el diagrama de fases.

El tiempo de retención controla el grado de reacción en la fase líquida; un tiempo de retención corto se caracteriza por la reorganización, mientras que un tiempo de retención largo se caracteriza por la disolución-reprecipitación y la esferoidización. El tiempo de retención óptimo se determinó experimentalmente, con una densificación rápida en la etapa inicial y un refinamiento lento en la etapa posterior. La velocidad de calentamiento afecta el punto de entrada de la ventana; una velocidad de calentamiento lenta evita el sobrecalentamiento localizado. El control de la atmósfera se utiliza conjuntamente; el flujo de hidrógeno arrastra los volátiles, manteniendo la estabilidad de la ventana.

Este control varía según el espesor de la palanquilla; las palanquillas más grandes tienen una ventana térmica más conservadora para evitar la deformación, mientras que las palanquillas más pequeñas pueden

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



tener una conservación térmica más prolongada para promover la uniformidad. Los aditivos químicos, como el cobalto, amplían la ventana térmica y mejoran la fluidez. El monitoreo se logra mediante la medición de temperatura multipunto con termopares para garantizar una temperatura constante dentro del horno. El enfriamiento es lento y sale por la ventana térmica para fijar la microestructura. Las variaciones incluyen la conservación térmica segmentada, con una etapa de mayor a menor para una conservación térmica optimizada. La gestión energética ambiental ahorra tiempo en la conservación térmica.

#### 6.4.3 Proceso integrado de sinterización al vacío y sinterización-prensado isostático en caliente

La sinterización al vacío y la sinterización por prensado isostático en caliente (HIP) son métodos avanzados para la producción de palanquillas de aleación de tungsteno de alta gama. La primera elimina las impurezas gaseosas mediante alto vacío, mientras que la segunda combina la sinterización con la densificación a presión, mejorando la calidad de palanquillas complejas o de alta exigencia. Este proceso es adecuado para pseudoaleaciones de tungsteno-cobre o sistemas de alta pureza. La sinterización al vacío implica el calentamiento en un horno de vacío, donde la presión negativa elimina los gases intersticiales y las impurezas volátiles, previene químicamente los residuos de hidrógeno, mantiene la limpieza de la interfaz y promueve la difusión en fase sólida o en fase líquida baja. La temperatura es más alta que en la sinterización tradicional para compensar la falta de flujo en fase líquida.

El proceso integrado de sinterización y prensado isostático en caliente (HIP) se completa en un solo equipo. Primero, se realiza la predensificación de la sinterización al vacío, seguida de un prensado isostático en caliente presurizado con argón, lo que garantiza una presión uniforme en todas las direcciones para eliminar los poros cerrados. Químicamente, la alta temperatura y la alta presión aceleran la difusión, lo que resulta en un contacto estrecho entre las partículas de tungsteno y una mejor unión interfacial. La ventaja del proceso reside en la reducción de la contaminación gracias a la carga en un solo horno, ideal tanto para palanquillas encapsuladas como no encapsuladas. Este proceso tiene un gran potencial en el pretratamiento de palanquillas de chapa ultrafina, reduciendo los defectos intermedios mediante la integración. La gestión del vacío es crucial; un vacío bajo evita las pérdidas por volatilización. Las curvas de temperatura y presión están vinculadas, y la sinterización precede a la presurización. Su alta pureza química lo hace adecuado para aleaciones dopadas con tierras raras. El enfriamiento lento al vacío evita la tensión. Entre las variaciones se incluye el prensado rápido en caliente. Se implementa un retorno de aceite de la bomba de vacío ambiental.

#### 6.4.4 Control de deformación de sinterización y diseño de herramientas de soporte

El control de la deformación durante la sinterización y el diseño de los soportes son aspectos cruciales del proceso de sinterización de palanquillas de aleación de tungsteno. Un soporte adecuado y el ajuste de los parámetros del proceso reducen la deformación gravitacional y la deformación causada por el ablandamiento a alta temperatura, garantizando así la precisión dimensional y una microestructura uniforme de la palanquilla. La aparición de la fase líquida durante la sinterización disminuye la resistencia de la palanquilla, y la gravedad provoca fácilmente hundimientos o deformaciones.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Químicamente, el flujo de la fase aglutinante agrava la deformación. El control debe comenzar con el método de soporte y la postura de carga del horno. Las placas de alúmina o molibdeno de alta pureza se utilizan comúnmente en el diseño de los soportes, ya que son resistentes a altas temperaturas y no se deforman. Los recubrimientos superficiales previenen la adhesión, y los recubrimientos químicos, como el nitruro de boro, reducen la fricción y las reacciones.

Existen diversas opciones de herramientas. Las palanquillas planas utilizan soporte multipunto o relleno de lecho de arena, donde las partículas de arena dispersan la tensión. Químicamente, la arena de cuarzo de alta pureza presenta buena inercia. La suspensión vertical es adecuada para palanquillas largas, con abrazaderas que fijan ambos extremos para reducir la flexión. El diseño considera la adaptación a la expansión térmica para evitar el agrietamiento por tensión térmica. El control de la deformación también implica velocidades de calentamiento lentas, una desgasificación completa a bajas temperaturas y tiempos de retención cortos durante la fase líquida para reducir el tiempo de flujo. También se emplea la optimización de la postura de la palanquilla, como la inclinación para equilibrar la gravedad.

Una atmósfera química sinérgica garantiza un flujo uniforme de hidrógeno y reduce el ablandamiento localizado. Durante la etapa de enfriamiento, los soportes mantienen bajas temperaturas para evitar la deformación por liberación de tensión térmica. Las herramientas reutilizables requieren limpieza para eliminar residuos. Variantes como los soportes flexibles de fibra cerámica se adaptan a diferentes formas. El reciclaje de materiales, respetuoso con el medio ambiente, reduce los costos.

#### **6.4.5 Garantizar la uniformidad de la temperatura durante la sinterización de placas de gran tamaño**

Un campo de temperatura uniforme durante la sinterización de placas de gran tamaño es crucial para lograr una microestructura y densidad consistentes. Esto se logra minimizando los gradientes de temperatura mediante el diseño del horno, los métodos de carga y el control del calentamiento, lo que evita la sobrecocción o la subcocción localizadas. Las placas de gran tamaño tienen una alta capacidad calorífica, lo que las hace propensas a una distribución desigual de la temperatura dentro del horno. Químicamente, las diferencias de temperatura afectan el tiempo de emergencia de la fase líquida, lo que provoca una reorganización inconsistente. Para solucionar esto, se optimizó la estructura del horno, con control de temperatura independiente en múltiples zonas de calentamiento y retroalimentación de termopar multipunto para el ajuste de la potencia. Las placas de protección contra la radiación distribuyen el flujo de calor uniformemente, reduciendo la pérdida de calor en los bordes.

El método de carga del horno prioriza el espaciado y la posición de las palanquillas, con un elemento calefactor auxiliar ubicado en el centro y un material de alta conductividad térmica en la base para una transferencia de calor uniforme. Circula una atmósfera química, con hidrógeno entrando y saliendo del horno de agitación a través de múltiples vías. La curva de calentamiento es segmentada y gradual, con ajustes del balance de potencia durante el período de espera. El sistema de monitoreo mapea el campo de temperatura en tiempo real, deteniendo los ajustes cuando se producen desviaciones significativas.

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

Este tipo de garantía es un reto en la sinterización de placas gruesas, donde la carga del horno multicapa requiere rotación o volteo para un calentamiento uniforme. Los revestimientos de alta pureza del horno reducen la contaminación que afecta la radiación térmica. El enfriamiento uniforme previene los gradientes de tensión térmica. Las variantes incluyen el calentamiento asistido por inducción con compensación localizada. La gestión energética ambiental ahorra energía mediante la regulación multizona.

## 6.5 Trabajo térmico y tratamiento térmico

El trabajo en caliente y el tratamiento térmico son las etapas de control de la deformación y la microestructura de las láminas de aleación de tungsteno, desde las palanquillas sinterizadas hasta las láminas terminadas. Mediante el forjado a alta temperatura, el laminado en caliente, el laminado en tibio y el recocido, se logra la reducción del espesor y la optimización del rendimiento. Este proceso aborda la fragilidad de las palanquillas sinterizadas e introduce estructuras fibrosas para mejorar la resistencia y la tenacidad. El principio del trabajo en caliente implica la recuperación dinámica y la recrystalización; químicamente, las altas temperaturas activan los sistemas de deslizamiento, y la fase aglutinante coordina la deformación de las partículas de tungsteno. El forjado rompe la estructura fundida, el laminado en caliente reduce el espesor mediante una gran deformación, y el recocido intermedio libera la tensión y restaura la plasticidad. El tratamiento térmico incluye el recocido al vacío y el envejecimiento para ajustar el tamaño del grano y los precipitados.

La optimización de procesos se centra en la adecuación de las ventanas de temperatura y los niveles de deformación. El procesamiento a alta temperatura es más sencillo, pero requiere protección contra la oxidación, mientras que el endurecimiento a baja temperatura es más rápido, pero conlleva riesgo de agrietamiento. El control atmosférico utiliza hidrógeno o vacío para prevenir la descarburación o la oxigenación. El diseño de laminación incorpora una reducción progresiva, y la lubricación reduce el daño superficial. La temperatura uniforme del horno durante el tratamiento térmico es crucial, ya que la velocidad de enfriamiento afecta la microestructura. La prevención de defectos se centra en las grietas en los bordes y la delaminación, mitigadas mediante revestimiento o presión lateral. En resumen, el trabajo en caliente y el tratamiento térmico demuestran la aplicación ingenieril de la plasticidad a alta temperatura, proporcionando una vía de deformación para las láminas de aleación de tungsteno, desde las de gran volumen hasta las de espesor delgado.

### 6.5.1 Proceso de forjado y laminado en caliente

El forjado y el laminado en caliente son las etapas iniciales del trabajo en caliente de las láminas de aleación de tungsteno. La alta temperatura y una gran deformación cuadran o adelgazan la palanquilla sinterizada, rompiendo las estructuras gruesas e introduciendo texturas de deformación, sentando las bases para el posterior laminado en frío. El forjado suele realizarse mediante forjado libre o forjado en matriz. La palanquilla se calienta a alta temperatura y se martilla o prensa bajo protección de hidrógeno. Químicamente, la alta temperatura reduce la resistencia a la deformación y la fase aglutinante fluye para

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

encapsular las partículas de tungsteno, evitando su rotura. El forjado multidireccional con direcciones alternas promueve una deformación uniforme y permite la formación fibrosa inicial de la microestructura.

El laminado en caliente sigue al forjado, con múltiples pasadas que adelgazan aún más la palanquilla. Cada pasada supone una reducción significativa, y los rodillos se calientan o la palanquilla se mantiene a temperatura constante. Químicamente, el laminado en caliente produce una recuperación dinámica activa, ya que la reorganización de las dislocaciones reduce la acumulación de endurecimiento. Una atmósfera o recubrimiento protector previene la oxidación y los lubricantes reducen la fricción. El recalentamiento entre pasadas restaura la plasticidad. La optimización de los parámetros implica una disminución gradual de la temperatura; el laminado inicial a alta temperatura es propenso a la deformación, mientras que el acabado a baja temperatura garantiza una superficie lisa.

Este proceso es particularmente evidente en la producción de láminas gruesas de aleación de tungsteno. La alta deformación total durante el forjado rompe la porosidad sinterizada, mientras que el laminado en caliente logra una forma similar a una placa. La gestión de la pureza química es crucial, y un bajo punto de rocío atmosférico previene la fragilización por hidrógeno. El control de grietas en los bordes se logra mediante rodillos de esquinas redondeadas o guías laterales. Las variaciones incluyen el laminado en caliente de revestimiento para proteger la superficie. La recuperación del calor residual ambiental ahorra energía.

#### 6.5.2 La forja multidireccional mejora la uniformidad de la microestructura

El forjado multidireccional es un método eficaz para mejorar la uniformidad de la microestructura en el trabajo en caliente de láminas de aleación de tungsteno. Al cambiar repetidamente la dirección de deformación, se logra una distribución equilibrada de la tensión interna y la microestructura en la palanquilla, reduciendo la segregación y la porosidad resultantes de la sinterización. Este método de forjado se utiliza ampliamente en la etapa de preparación de palanquillas. Tras calentar la palanquilla a alta temperatura, se forja alternativamente a lo largo de múltiples ejes. Químicamente, la alta temperatura activa la deformación coordinada de las partículas de tungsteno, y la fase aglutinante fluye para rellenar los huecos, promoviendo la reorganización de las partículas y la ruptura de los agregados gruesos. El forjado unidireccional tiende a formar texturas direccionales y gradientes de densidad, mientras que el forjado multidireccional dispersa la segregación a través de campos de tensión transversal, lo que hace que la microestructura sea más isótropa.

El proceso de forja suele implicar varias rondas, cada una de las cuales cambia de dirección (p. ej., secuencia de ejes XYZ). La deformación total se acumula gradualmente, y la deformación química repetida induce una recuperación dinámica, mientras que la reorganización de las dislocaciones reduce el endurecimiento localizado. El recalentamiento en el horno entre cambios de dirección restaura la plasticidad y previene las grietas por deformación en frío. Las ventajas del proceso residen en mejorar la uniformidad del centro de las palanquillas grandes y reducir la diferencia de densidad entre los bordes y el centro. Los accesorios de soporte facilitan el posicionamiento y previenen la deformación asimétrica.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Este proceso de forjado desempeña un papel fundamental en la producción de láminas de aleación de tungsteno de alta densidad, lo que resulta en una microestructura refinada, una mayor esferoidización de las partículas de tungsteno y una mejor unión interfacial. La gestión de la pureza química es crucial, y una atmósfera protectora es esencial para prevenir la oxidación y asegurar una adecuada coordinación de la deformación. La adecuación de la frecuencia de forjado y la cantidad de reducción evita una velocidad excesiva que podría provocar desgarros internos. Variaciones como las combinaciones radial-axiales permiten adaptarlas a diferentes formas. El aprovechamiento del calor residual ambiental ahorra energía.

### 6.5.3 Tratamiento térmico de recocido intermedio y alivio de tensiones

El recocido intermedio y el tratamiento térmico de alivio de tensiones son pasos intermedios necesarios en la secuencia de trabajo en caliente de las láminas de aleación de tungsteno. Estos procesos, realizados al vacío o en atmósfera protectora, liberan la tensión residual y el endurecimiento por acritud acumulados durante el laminado, restaurando la plasticidad del material y preparándolo para la siguiente pasada de deformación. Este tratamiento térmico se lleva a cabo después del laminado en caliente o entre pasadas de laminado en frío, con la temperatura controlada por debajo o ligeramente por encima del umbral de recrystalización. Químicamente, la difusión a alta temperatura impulsa la migración y aniquilación de las dislocaciones, mientras que el ablandamiento de la fase aglutinante coordina la liberación de tensiones de las partículas de tungsteno. El recocido al vacío previene la oxidación, y los procesos basados en hidrógeno reducen aún más la superficie.

El proceso de recocido consta de etapas de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento. El tiempo de mantenimiento permite una relajación suficiente de la tensión, refinando químicamente la microestructura mediante la migración del límite de grano y disolviendo u homogeneizando las fases precipitadas. El enfriamiento lento evita la introducción de nuevas tensiones. La ventaja del proceso reside en la prevención de grietas en los bordes o delaminación causadas por el endurecimiento acumulativo, lo cual es crucial para la recuperación en el laminado multipaso. El rango de temperatura se ajusta según el sistema de aleación; se utiliza un rango más alto para las aleaciones de níquel-hierro para facilitar la recuperación.

Este tratamiento térmico se utiliza frecuentemente en la producción de chapa fina, e implica numerosos ciclos de recocido tras una gran deformación por laminación en frío para garantizar una eficiencia óptima del procesamiento. La pureza de la atmósfera química es crucial, ya que los bajos puntos de rocío previenen la fragilización por hidrógeno. La temperatura uniforme del horno garantiza resultados consistentes en múltiples palanquillas. Variaciones como el recocido en gradiente optimizan las diferencias entre la superficie y el núcleo. El mantenimiento de la bomba de vacío ambiental reduce la contaminación.

### 6.5.4 Tratamiento de solución a alta temperatura y enfriamiento rápido

El tratamiento de solución a alta temperatura y el enfriamiento rápido son métodos de reforzamiento en el tratamiento térmico de láminas de aleación de tungsteno. Al disolver los elementos de aleación a altas

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperaturas y bloquearlos rápidamente en un estado sobresaturado, se mejoran la resistencia y la estabilidad del material a alta temperatura. Este tratamiento se aplica a menudo después del trabajo en caliente final o cuando se cumplen requisitos específicos de rendimiento. El tratamiento de solución consiste en calentar la lámina a una temperatura superior a la que la fase aglutinante se disuelve completamente y mantenerla a esa temperatura. Químicamente, los átomos de tungsteno se disuelven en la fase aglutinante de forma limitada, formando una solución sólida sobresaturada. La difusión de los elementos interfaciales mejora la unión. El período de retención permite una disolución uniforme, evitando la segregación localizada.

El enfriamiento rápido, como el temple con agua o con gas, congela el material a alta temperatura, inhibiendo químicamente la precipitación y preservando los efectos de endurecimiento de las fases finamente dispersas o de la solución sólida. La elección del medio de enfriamiento equilibra la tensión de temple y el riesgo de oxidación; el temple con gas inerte es más suave. Las ventajas del proceso residen en una mayor dureza y resistencia térmica, gracias a que las fases aglutinantes sobresaturadas fijan las dislocaciones y aumentan la resistencia.

Este tratamiento se aplica a láminas de aleación de tungsteno resistentes al desgaste o termodispersables, lo que aumenta la resistencia tras el tratamiento de solución, pero requiere un control de la tenacidad. El vacío en atmósfera química previene la descarburación. El control preciso de la temperatura evita el sobrecalentamiento y el engrosamiento. Variaciones como el enfriamiento por etapas optimizan la distribución de la tensión. El reciclaje de medios ambientales reduce el consumo.

## 6.6 Laminación en frío y laminación en caliente para preparación de chapas

El laminado en frío y el laminado en caliente son etapas de acabado en la producción de láminas de aleación de tungsteno. Mediante el laminado multipasada a temperatura ambiente o media, la palanquilla trabajada en caliente se adelgaza gradualmente hasta alcanzar el espesor deseado, formando una microestructura fina y una excelente calidad superficial. Este proceso es adecuado para preparar láminas con tamaños desde milímetros hasta micrómetros. El laminado en frío, realizado a temperatura ambiente, produce un endurecimiento por deformación significativo y una gran deformación total. El laminado en caliente, por otro lado, facilita la recuperación dentro del rango de temperatura media, reduciendo el riesgo de agrietamiento. Los principios del proceso incluyen la multiplicación de dislocaciones, la recuperación dinámica y la formación de textura. Químicamente, la fase aglutinante coordina las partículas de tungsteno durante la deformación, previniendo la fractura frágil. La distribución de la reducción por pasada debe ser gradual, con una gran reducción inicial para el conformado y una reducción menor para el acabado en las etapas posteriores. La dirección del laminado y el control de la textura afectan la anisotropía, y el manejo de los bordes previene el agrietamiento.

La optimización de procesos se centra en la lubricación y el control de la tensión. El laminado en frío utiliza lubricación con aceite para reducir la fricción, mientras que el laminado en caliente utiliza protección con gas inerte para prevenir la oxidación. Los intervalos de recocido intermedio liberan tensiones y restauran la plasticidad. La producción de chapa fina prioriza la precisión del laminador y un

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sistema de laminado de alta rigidez para evitar fluctuaciones de espesor. La prevención de defectos se centra en las grietas y la piel de naranja, que se mitigan mediante el recorte y la inspección de la superficie.

#### **6.6.1 Distribución de la deformación total del laminado en frío y especificación de reducción de pasadas**

La asignación de la deformación total del laminado en frío y el programa de reducción de pasadas son aspectos fundamentales de la planificación del proceso de adelgazamiento de láminas de aleación de tungsteno. Mediante la distribución racional de la velocidad total de procesamiento y la reducción en una sola pasada, se garantiza una deformación uniforme y una tensión controlable, lo que previene grietas y deformaciones. Este programa comienza con una palanquilla laminada en caliente, donde la deformación total suele ser alta para lograr un refuerzo de grano fino y precisión de espesor. El principio de asignación consiste en aplicar inicialmente una mayor reducción en cada pasada para aprovechar la termoplasticidad residual en el conformado, y luego reducirla gradualmente en pasadas posteriores para refinar la superficie. Químicamente, la gran reducción activa el sistema de deslizamiento múltiple, permitiendo que la fase aglutinante fluya completamente y encapsule las partículas de tungsteno, reduciendo así su rotura. El diseño del programa considera el estado del material: el endurecimiento inicial por trabajo en frío es lento, lo que permite una mayor reducción, mientras que la acumulación posterior del endurecimiento requiere una reducción menor y mayores intervalos de recocido. La aplicación uniforme de aceite lubricante entre pasadas reduce la fricción del rodillo y previene químicamente el atascamiento del rodillo, que puede causar rayones superficiales. El control de tensión ayuda a estabilizar la forma de la lámina y evita las ondulaciones en el centro o los bordes. La deformación total se calcula en función del espesor objetivo; las láminas ultrafinas requieren múltiples ciclos de laminado y recocido.

Este proceso permite ajustes flexibles durante la transición de espesores estándar a láminas delgadas, con aleaciones de alto contenido de tungsteno sometidas a un laminado conservador para evitar el agrietamiento de los bordes. La gestión de la atmósfera química previene la oxidación de la lámina laminada. El proceso registra el espesor de pasada y ajusta las desviaciones en tiempo real. Variantes como el laminado asimétrico optimizan la forma de la lámina. El reciclaje de lubricantes, respetuoso con el medio ambiente, reduce la contaminación.

#### **6.6.2 Aplicación del laminado en caliente en aleaciones con alto contenido de tungsteno**

La aplicación del laminado en caliente en aleaciones con alto contenido de tungsteno mitiga el riesgo de fragilidad asociado al laminado en frío a temperatura ambiente, al laminar en un rango de temperatura intermedio. Utiliza un calentamiento moderado para activar el mecanismo de recuperación, logrando perfiles más delgados con una gran deformación. Esta aplicación es especialmente adecuada para sistemas de aleación con alto contenido de tungsteno. La temperatura del laminado en caliente se controla por debajo de la temperatura de recristalización de recuperación. El calentamiento químico reduce la resistencia a la deformación, ablanda la fase aglutinante para mejorar la coordinación y reduce la resistencia al deslizamiento de las partículas de tungsteno, evitando así las grietas en los bordes, comunes

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

en el laminado en frío. El laminador está equipado con dispositivos de calentamiento o precalienta la palanquilla, y la protección con gas inerte previene la oxidación.

Las ventajas del laminado en caliente residen en su endurecimiento y recuperación equilibrados, una mayor reducción por pasada en comparación con el laminado en frío, una mayor eficiencia de procesamiento general y tiempos de recocido más cortos. Químicamente, el laminado en caliente presenta una recuperación dinámica más activa, lo que reduce la reorganización y acumulación de dislocaciones, lo que resulta en una calidad superficial superior a la del laminado en frío puro. El proceso combina la transición del laminado en caliente con el acabado del laminado en frío, creando una trayectoria híbrida. Las aleaciones con alto contenido de tungsteno tienen menos fases aglutinantes, y el laminado en caliente amplía la ventana de deformación.

Esta aplicación muestra un gran potencial en láminas ultrafinas de aleación de tungsteno de alta densidad, que producen una microestructura fina y fibrosa con una resistencia y tenacidad equilibradas tras el laminado en caliente. La lubricación química garantiza la adaptabilidad a altas temperaturas, mientras que el grafito o los aceites especiales evitan la adherencia. La uniformidad de la temperatura es crucial, y el calentamiento por inducción proporciona una respuesta rápida. Las variantes incluyen asistencia para el calentamiento de los rodillos. La extracción de gases de escape ambiental garantiza la seguridad.

### 6.6.3 Control de la dirección de laminación y optimización de la textura

El control de la dirección de laminación y la optimización de la textura son métodos de control de la microestructura en los procesos de laminación en frío y en caliente de láminas de aleación de tungsteno. Al ajustar la textura de deformación y la orientación de los cristales mediante trayectorias de laminación unidireccionales, transversales o multidireccionales, se modifica la anisotropía y el equilibrio de rendimiento del material. Esta optimización ayuda a lograr el control direccional de la resistencia, la tenacidad y la expansión térmica. La laminación unidireccional forma una textura fibrosa resistente, alarga las partículas de tungsteno a lo largo de la dirección de laminación y produce una orientación preferida gracias al apilamiento plano de las dislocaciones químicas, lo que aumenta la resistencia longitudinal pero reduce la tenacidad transversal. La laminación transversal gira 90 grados en cada pasada, alterando la orientación y debilitando la textura hasta un estado más aleatorio.

Los principios de optimización se seleccionan en función de la aplicación. Las láminas de blindaje requieren laminado cruzado isotrópico, mientras que los componentes estructurales con resistencia longitudinal requieren laminado unidireccional. Las variantes multidireccionales, como el laminado pendular, homogeneizan aún más el material. Químicamente, la textura afecta la distribución de la tensión interfásica; la optimización reduce el tratamiento térmico residual. El recocido, combinado con otros métodos, controla la resistencia de la textura; el recocido a alta temperatura la debilita, mientras que el recocido a baja temperatura la conserva. Este control y optimización tienen un impacto significativo en la producción de láminas; las láminas ultrafinas con texturas fuertes son propensas a doblarse y agrietarse, lo cual se mejora mediante la optimización cruzada. El análisis químico mediante figuras polares de difracción de rayos X evalúa la densidad de orientación. Las marcas de orientación

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



facilitan el uso posterior del producto terminado. Las variantes incluyen el laminado oblicuo para texturas especiales. Se utilizan sistemas de rodillos ecológicos para la limpieza y la prevención de arañazos.

#### 6.6.4 Proceso de prevención y recorte de grietas en los bordes

La prevención y el recorte de grietas en los bordes son aspectos cruciales de la gestión de defectos en el laminado de láminas de aleación de tungsteno. Ajustar los parámetros de laminado, proteger los bordes y recortar regularmente reduce la aparición y propagación de grietas, garantizando la integridad y el rendimiento de la lámina. Las grietas en los bordes se originan por la concentración de tensiones, resultado químico de un alto cizallamiento en los bordes de las partículas de tungsteno y una coordinación insuficiente de las fases de unión. Las medidas preventivas incluyen la disminución gradual de la presión de laminado por pasada, transiciones de borde suaves y el uso de rodillos guía laterales para restringir la forma de la lámina y evitar que la ondulación de los bordes genere tensión de tracción.

Los procesos de recorte utilizan cizallas o cortadoras de ruedas para eliminar periódicamente los bordes agrietados, y la limpieza química de las superficies de corte previene el agrietamiento secundario. La prevención también implica una lubricación uniforme y la aplicación de un recubrimiento adicional a los bordes para evitar la fricción en seco. El laminado en caliente reduce la susceptibilidad a las grietas, mientras que el laminado en frío controla la acumulación de endurecimiento y realiza el recocido rápidamente.

Este proceso de prevención y recorte se utiliza con frecuencia en el laminado de chapa fina, donde las grietas se propagan fácilmente en la fase ultrafina, lo que requiere intervalos de recorte cortos. La inspección química de la superficie se facilita mediante pruebas de penetración por fluorescencia. Los residuos de recorte se reciclan y se pulverizan. Variantes como el recorte láser ofrecen acabados precisos y sin rebabas. La filtración ecológica del fluido de corte garantiza la seguridad.

#### 6.7 Tratamiento y acabado de superficies

El tratamiento y el acabado superficial son las etapas finales de la producción de láminas de aleación de tungsteno. Métodos como la limpieza química, el mecanizado y el nivelado térmico eliminan los defectos superficiales, mejoran la planitud y la suavidad, y optimizan la apariencia, la resistencia a la corrosión y la adaptabilidad funcional del material. Este proceso afecta directamente la integridad superficial y el rendimiento de adhesión de la lámina en aplicaciones de precisión. El tratamiento superficial se centra en las capas de óxido, las fases enriquecidas y las superficies rugosas resultantes del laminado o el tratamiento térmico, mientras que el acabado logra precisión dimensional y calidad del borde. Los principios del proceso incluyen la disolución química, la eliminación mecánica y la liberación de tensiones térmicas. El tratamiento químico ofrece alta selectividad, el tratamiento mecánico ofrece alta eficiencia y el nivelado térmico combina las ventajas de ambos. La secuencia de procesamiento generalmente incluye primero la limpieza y la descontaminación, seguidas del pulido y, finalmente, el corte a medida.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El proceso de acabado prioriza la limpieza y la no destrucción. La limpieza química evita la corrosión residual, el pulido mecánico controla la incrustación de partículas y la nivelación térmica por vacío previene la reoxidación. El corte por láser o chorro de agua permite lograr formas complejas y reduce la zona afectada por el calor. El control de calidad incluye la medición de la rugosidad superficial y la inspección visual para garantizar el valor Ra y la ausencia de grietas. Las consideraciones ambientales incluyen la neutralización y el reciclaje de líquidos residuales, y la recolección segura de polvo.

#### 6.7.1 Limpieza química y decapado ácido para eliminar la capa de óxido

La limpieza química y el decapado ácido para eliminar la capa de óxido son los pasos principales en el tratamiento de la superficie de las láminas de aleación de tungsteno. Las soluciones ácidas disuelven y eliminan la cascarilla de óxido y la suciedad formada durante el laminado o el tratamiento térmico, restaurando el brillo metálico y proporcionando un sustrato limpio para el procesamiento posterior. Este método disuelve selectivamente los óxidos con un daño mínimo al sustrato. El proceso de limpieza comienza con un lavado alcalino para eliminar el aceite, seguido de un decapado ácido para eliminar principalmente los óxidos. Químicamente, la capa de óxido se compone principalmente de óxido de tungsteno y óxidos aglutinantes, que se disuelven eficazmente mediante mezclas de ácido nítrico, ácido fluorhídrico o ácido sulfúrico, lo que permite que el tungsteno forme complejos que entran en la solución. El tiempo y la temperatura del decapado se controlan cuidadosamente para evitar el sobregrabado, que puede provocar picaduras en la superficie o fragilización por hidrógeno.

Las ventajas del proceso residen en la eficiente eliminación de capas delgadas de óxido, su idoneidad para láminas de diversos espesores y la posibilidad de ajustar la formulación química según el sistema de aleación. En los sistemas de níquel-cobre, la baja concentración de ácido evita la disolución excesiva del cobre. Tras la limpieza, el enjuague con agua y la neutralización son seguidos por una pasivación para formar una película protectora temporal. El tratamiento de líquidos residuales implica la neutralización y la recuperación de iones fluoruro o nitratos. Este método de limpieza se utiliza ampliamente en chapas laminadas en caliente. La eliminación de incrustaciones gruesas de óxido mejora la actividad superficial, facilitando el pulido o el chapado. El control químico del pH y la concentración garantiza la consistencia del lote. Variantes como la disolución asistida por ultrasonidos aceleran el proceso. Un sistema ambiental de circuito cerrado reduce las emisiones.

#### 6.7.2 El lavado alcalino elimina el enriquecimiento superficial de la fase aglutinante

El lavado alcalino para eliminar el enriquecimiento superficial de la fase aglutinante es un método de tratamiento superficial específico para láminas de aleación de tungsteno. Disuelve selectivamente el enriquecimiento superficial de la fase aglutinante causado por el laminado o el tratamiento térmico con una solución alcalina, equilibrando la composición superficial y mejorando la resistencia a la corrosión. Este método se aplica en aleaciones con alto contenido de fases aglutinantes para evitar la corrosión preferencial de la capa enriquecida. El proceso de limpieza consiste en la inmersión en una solución caliente de hidróxido de sodio o carbonato de sodio. Químicamente, el álcali reacciona con óxidos de níquel o cobre para formar sales solubles, mientras que la fase inerte de tungsteno permanece

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

prácticamente insoluble. A continuación, se retira una fina capa de la capa enriquecida superficial, dejando expuesto el sustrato equilibrado.

El proceso ofrece ventajas como alta selectividad, mínimo daño a la estructura de tungsteno y idoneidad para láminas no magnéticas o térmicamente conductoras. El control preciso de la temperatura y el tiempo acelera la disolución a la vez que previene la picadura excesiva. Después de la limpieza, el álcali residual se neutraliza con ácido, seguido de enjuague y secado. La agitación auxiliar o la ultrasonificación mejoran la uniformidad. Este lavado alcalino es particularmente efectivo en láminas de sistema níquel-cobre, donde el cobre tiende a acumularse en la superficie laminada, lo que resulta en una conductividad uniforme después del lavado. El análisis químico de la composición de la superficie verifica el efecto de eliminación. Variaciones como el lavado alcalino electrolítico aceleran el proceso. También es posible la regeneración y el reciclaje de la solución alcalina ambiental.

### 6.7.3 Rectificado y pulido mecánico

El rectificado y pulido mecánico son los métodos principales para el acabado superficial de las láminas de aleación de tungsteno. Mediante el uso de bandas abrasivas, muelas abrasivas o pasta de pulido, se eliminan gradualmente la rugosidad y los defectos de la superficie para lograr una alta suavidad y una baja rugosidad. Este método es adecuado para láminas de diversos espesores, mejorando tanto la apariencia como la calidad funcional de la superficie. El rectificado comienza con un desbaste para eliminar las marcas de óxido y las ondulaciones, seguido de un rectificado progresivamente más fino con bandas abrasivas o muelas abrasivas. El cizallamiento químico y mecánico elimina material; debido a la alta dureza del tungsteno, se requieren abrasivos de diamante o carburo de boro. El pulido se realiza con una muela de tela suave con pasta de pulido, y la fricción fina produce un acabado de espejo.

El proceso ofrece una precisión controlable, con un valor Ra decreciente gradualmente, adecuado tanto para superficies planas como curvas. Se ofrece pulido en seco o húmedo, con refrigeración en el pulido húmedo para evitar daños por calor. La graduación se realiza de grueso a fino, con limpieza intermedia para evitar la incrustación de partículas. Esta técnica de pulido y pulido es ideal para placas de colimadores médicos de alta precisión, ya que reduce la dispersión en el acabado de espejo. El pulido posterior a la limpieza química previene la acumulación de residuos. Entre las variantes se incluye el pulido vibratorio para conformar formas complejas de manera uniforme. La recolección de polvo ambiental es segura.

### 6.7.4 Proceso de nivelación térmica con protección de vacío/hidrógeno

Nivelación de láminas delgadas de aleación de tungsteno. Libera la tensión residual bajo atmósfera protectora mediante tensión o laminado a alta temperatura, mejorando la planitud y la estabilidad dimensional de la lámina. Este proceso es adecuado para láminas delgadas que se deforman fácilmente. El proceso consiste en calentar la lámina a su temperatura de alivio de tensión en un horno de vacío o de hidrógeno, aplicando una ligera tensión o pasándola por rodillos de nivelación. Químicamente, la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

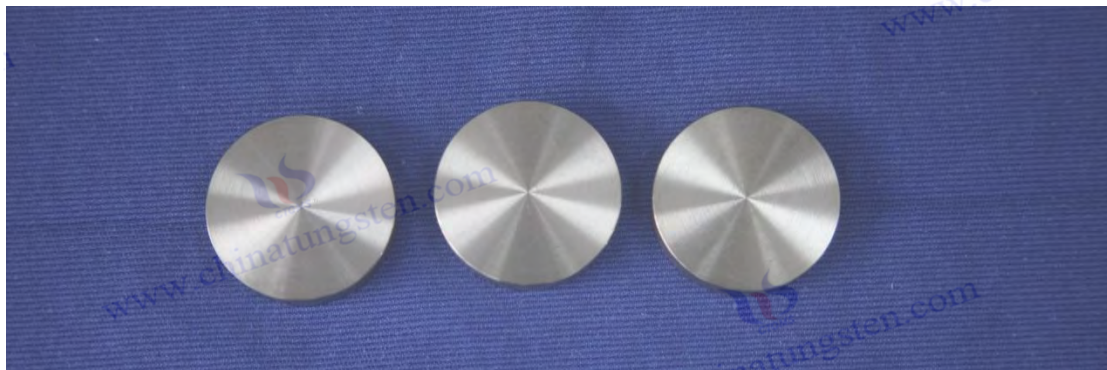
difusión a alta temperatura relaja las dislocaciones, ablandando la fase aglutinante y coordinando la deformación. El vacío previene la oxidación, mientras que el hidrógeno reduce la superficie.

Las ventajas residen en su naturaleza sin contacto o de mínimo contacto, lo que resulta en una superficie impecable y una alta planitud. Las temperaturas inferiores a los niveles de recrystalización previenen cambios estructurales. El control uniforme de la tensión previene el estiramiento localizado. Este proceso se utiliza ampliamente en láminas ultrafinas de aleaciones de tungsteno, donde la deformación tras el laminado en frío se corrige mediante el aplanado en caliente. La pureza química es crucial, y un punto de rocío bajo previene la fragilización por hidrógeno. Entre las variantes se incluye el aplanado continuo por tensión en horno. Ofrece un entorno hermético y energéticamente eficiente.

### 6.7.5 Corte de precisión, corte por láser y corte por chorro de agua

El corte de precisión, el corte por láser y el corte por chorro de agua son métodos para el mecanizado de precisión de láminas de aleación de tungsteno, incluyendo formas dimensionales e irregulares. Estos métodos utilizan cuchillas mecánicas, rayos láser o chorros de agua a alta presión para lograr bordes limpios y formas complejas, satisfaciendo así diversos requisitos de tamaño. El corte de precisión utiliza máquinas de corte de alta precisión con filos afilados, lo que resulta en una fractura por fuerza de corte químicamente concentrada. Es adecuado para láminas rectangulares de cantos rectos y su separación ajustable evita rebabas.

El corte por láser utiliza un láser de alta energía para fundir y vaporizar materiales, seguido de la eliminación de escoria mediante gas inerte. Químicamente, presenta una pequeña zona afectada por el calor, lo que lo hace adecuado para contornos y orificios complejos. El control de la densidad de potencia permite ranuras estrechas. El corte por chorro de agua utiliza un chorro abrasivo mezclado con agua a alta presión, lo que resulta en un corte en frío sin deformación térmica y con abrasión puramente mecánica, adecuado para chapas gruesas o aleaciones termistoras. Este método de corte es flexible en chapas de aleación de tungsteno personalizadas, produciendo orificios láser de precisión y bordes de corte por chorro de agua sin tensiones. La limpieza química posterior al corte previene la contaminación. Variantes como los láseres de fibra pueden aumentar la velocidad. Los residuos ambientales se pueden reciclar de forma segura.



CTIA GROUP LTD Láminas 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

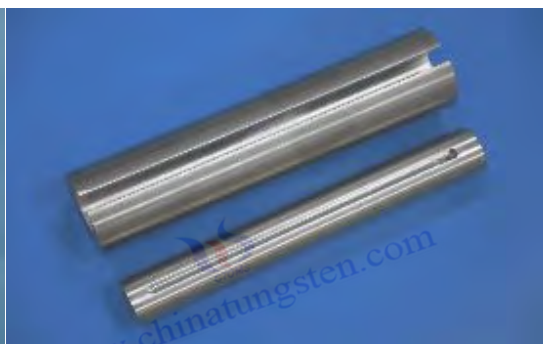
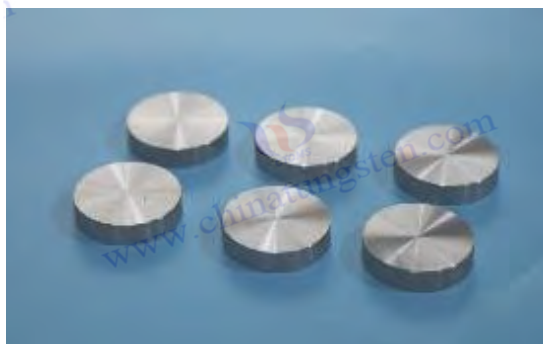
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 láminas de aleación de tungsteno

### 7.1 Aplicación de láminas de aleación de tungsteno en la industria militar y de defensa

Las láminas de aleación de tungsteno se utilizan principalmente en las industrias de defensa y militar para componentes que requieren alta densidad, alta resistencia y buena tenacidad. Su alto punto de fusión y resistencia al desgaste garantizan un rendimiento estable en entornos hostiles. Entre sus aplicaciones se incluyen contrapesos y estructuras de protección, con integración funcional lograda mediante procesamiento.

#### 7.1.1 Lámina de aleación de tungsteno para perforación de blindaje

Las láminas de aleación de tungsteno en componentes perforantes utilizan alta densidad y propiedades autoafilantes para proporcionar concentración de energía cinética y capacidad de penetración. El diseño de la aleación equilibra dureza y tenacidad, y el acabado superficial proporciona estabilidad a alta velocidad.

#### 7.1.2 Lámina de aleación de tungsteno para contrapeso

Se utilizan láminas de aleación de tungsteno como materiales de contrapeso, con alta densidad para ajustar el peso en un espacio limitado, lo que ayuda a equilibrar la inercia y controlar la vibración. El espesor uniforme garantiza la precisión y el tratamiento superficial mejora la durabilidad.

#### 7.1.3 Lámina de aleación de tungsteno para protección

Las láminas de aleación de tungsteno contribuyen a la atenuación de la radiación y la absorción de impactos en estructuras de protección, proporcionando un blindaje de capa fina de alta densidad y alta eficiencia. El diseño compuesto mejora la resistencia general y es adecuado para sistemas de protección multicapa.

### 7.2 Aplicación de láminas de aleación de tungsteno en la fabricación de alta gama

tungsteno en la fabricación de alta gama se deben principalmente a sus características combinadas de alta densidad, dureza y buena maquinabilidad. Estas aplicaciones abarcan la fabricación de moldes, herramientas de corte y componentes mecánicos de precisión, lo que contribuye a alcanzar los objetivos de diseño de miniaturización, alta fiabilidad y larga vida útil. Las láminas de aleación de tungsteno logran una microestructura uniforme mediante pulvimetalurgia y laminado de precisión, lo que proporciona resistencia al desgaste y al ablandamiento a alta temperatura en los insertos de molde, ofrece un soporte rígido en las herramientas de corte y aprovecha su ventaja de densidad para ajustar la distribución de masa en los contrapesos mecánicos. En la práctica, las láminas de aleación de tungsteno suelen combinarse con otros materiales o someterse a tratamientos superficiales para ampliar aún más sus límites funcionales.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La fabricación de alta gama exige un alto grado de equilibrio en las propiedades de los materiales, y las láminas de aleación de tungsteno destacan en aplicaciones de alta tensión, alta temperatura y alta precisión gracias a su alto módulo elástico y estabilidad térmica. A medida que la fabricación avanza hacia diseños inteligentes y ligeros, la aplicación de las láminas de aleación de tungsteno se está expandiendo desde los moldes tradicionales hasta los soportes de fabricación aditiva y los componentes de instrumentos de precisión. Los recubrimientos superficiales o los tratamientos térmicos pueden optimizar aún más su resistencia a la corrosión y sus propiedades de adhesión para adaptarse a condiciones operativas complejas. Las láminas de aleación de tungsteno están disponibles en varios espesores, desde láminas más delgadas para incrustaciones de precisión hasta láminas más gruesas para soporte estructural.

### 7.2.1 Lámina de aleación de tungsteno para insertos de molde

de tungsteno en insertos de molde se deben a su alta dureza, resistencia al desgaste y resistencia al ablandamiento a altas temperaturas. Esta aplicación es común en moldes de inyección de plástico, moldes de fundición a presión y moldes de prensado en caliente de vidrio, lo que ayuda a prolongar la vida útil del molde y a mejorar la calidad del producto. Como parte fundamental del molde, el inserto soporta altas temperaturas, altas presiones y desgaste de forma continua. Las láminas de aleación de tungsteno, incrustadas en el cuerpo del molde, proporcionan áreas localmente altamente resistentes al desgaste, lo que reduce el consumo total de material del molde. La estructura bifásica de la lámina de aleación de tungsteno desempeña un papel crucial en el inserto: las partículas de tungsteno actúan como fase dura para resistir la erosión abrasiva, mientras que la fase aglutinante proporciona cierta tenacidad para prevenir la fractura frágil.

En los moldes de inyección de plástico, se suelen utilizar láminas de aleación de tungsteno en los bordes de las cavidades o en las zonas de entrada para resistir el impacto y los ciclos térmicos del plástico fundido. El pulido superficial reduce la tendencia a adherirse al molde y mejora la eficiencia del desmoldeo. En las aplicaciones de moldes de fundición a presión, los insertos se enfrentan a impactos a alta velocidad y corrosión a alta temperatura del metal fundido; la estabilidad térmica de las láminas de aleación de tungsteno ayuda a mantener la precisión dimensional y reduce las grietas por fatiga térmica. En los moldes de prensado en caliente de vidrio, su baja expansión térmica y alta dureza garantizan la fidelidad de la forma durante el moldeo de componentes ópticos de precisión. En el diseño de insertos, las láminas de aleación de tungsteno se unen al acero del molde mediante soldadura fuerte, incrustación o fijación con tornillos; los tratamientos de interfaz, como el niquelado, mejoran la adhesión.

Las aplicaciones se han expandido a matrices de estampado de alta precisión. Los insertos de aleación de tungsteno se utilizan en el moldeo de marcos de teléfonos móviles o conectores electrónicos para resistir el estampado repetido de láminas de acero inoxidable o aleación de titanio. Un diseño de gradiente de dureza superficial equilibra la resistencia al desgaste y la resistencia al astillado. En los últimos años, con el rápido desarrollo de vehículos eléctricos y electrónica de consumo, la demanda de matrices de larga duración ha impulsado el desarrollo de insertos de aleación de tungsteno hacia materiales nanocristalinos o reforzados por dispersión, mejorando aún más la resistencia a la fatiga. Los

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

recubrimientos de superficie como DLC o TiAlN son comunes, formando una película dura a través de la deposición química de vapor, que funciona sinérgicamente con el sustrato para la resistencia al desgaste. El espesor del inserto de aleación de tungsteno se selecciona de acuerdo con el tamaño de la matriz; los insertos más delgados se utilizan en micromatrices, mientras que los insertos más gruesos soportan grandes cargas.

La tecnología de procesamiento influye en el efecto de la aplicación: el rectificado de precisión garantiza la planitud de los insertos y el tratamiento térmico ajusta la distribución de la dureza. Durante el mantenimiento del molde, las láminas de aleación de tungsteno son fáciles de reemplazar localmente, lo que reduce los costos generales. En cuanto a la adaptabilidad ambiental, los insertos se mantienen estables en lubricación con aceite a alta temperatura o refrigerantes a base de agua. La aplicación de láminas de aleación de tungsteno también promueve el diseño modular de moldes, y las especificaciones estandarizadas de los insertos facilitan la gestión del inventario.

### 7.2.2 Láminas de aleación de tungsteno para herramientas de corte

Las láminas de aleación de tungsteno se utilizan principalmente en herramientas de corte como sustrato o inserto, aprovechando su alta dureza y estabilidad térmica para proporcionar soporte de corte. Esta aplicación se observa en ciertas herramientas de corte especializadas e insertos resistentes al desgaste, lo que facilita el manejo de materiales difíciles de mecanizar o en condiciones de alta temperatura. En el diseño de herramientas, las láminas de aleación de tungsteno suelen combinarse con carburo cementado o cerámica para formar una estructura híbrida. La aleación de tungsteno proporciona una base resistente, mientras que una capa dura se suelda o se suelda a la superficie, lo que mejora la vida útil de la herramienta. La ventaja de la densidad de las láminas de aleación de tungsteno ayuda a equilibrar y reducir la vibración en las herramientas rotativas.

En herramientas de tomeado o fresado, se utilizan insertos de aleación de tungsteno en portaherramientas o soportes para soportar fuerzas de corte y cargas térmicas. La fase ligada coordina la deformación y absorbe el impacto, evitando el astillado de la punta de la herramienta. Su estabilidad química hace que la herramienta sea resistente a la corrosión en entornos con refrigerante, y los tratamientos superficiales, como el recubrimiento químico, proporcionan mayor protección. Sus aplicaciones se extienden a herramientas de carpintería o de mecanizado de materiales compuestos, donde los insertos de aleación de tungsteno resisten la abrasión de la fibra y mantienen un filo afilado.

Las láminas de aleación de tungsteno también se utilizan en casquillos para ciertas matrices de trefilado o herramientas de extrusión, donde se incrustan anillos o láminas de aleación de tungsteno en el orificio interior para resistir la abrasión por flujo de metal. El espesor se selecciona en función de la forma del cuerpo de la herramienta; las láminas más delgadas se utilizan para herramientas de precisión de carga ligera, mientras que las láminas más gruesas soportan cortes de alta resistencia. El texturizado de superficies, como el procesamiento de microestructura láser, mejora el rendimiento de arranque de viruta. La función de las láminas de aleación de tungsteno en las herramientas de corte promueve el diseño de compuestos multimaterial, y las interfaces de soldadura fuerte optimizan la resistencia de la unión.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



materiales difíciles de cortar, las láminas de aleación de tungsteno han evolucionado hacia una estructura de gradiente, con una superficie dura y un núcleo tenaz. El tratamiento térmico ajusta la distribución de la dureza de la herramienta de corte, y el endurecimiento por solución mejora la resistencia al calor. Durante el reafileado de la herramienta, la matriz de aleación de tungsteno admite múltiples operaciones de afilado. En cuanto a su adaptabilidad ambiental, se mantiene estable durante el corte en seco o con lubricación mínima.

### 7.2.3 Láminas de aleación de tungsteno para contrapesos mecánicos

tungsteno en contrapesos mecánicos aprovechan su alta densidad para lograr la concentración de masa en un espacio limitado, lo que ayuda a la maquinaria de precisión a ajustar su centro de gravedad, equilibrar la inercia y reducir la vibración. Esta aplicación es común en instrumentos analíticos, dispositivos de navegación inercial y plataformas ópticas. Las láminas de contrapeso se mecanizan con precisión en formas específicas y se incrustan o adhieren a la estructura mecánica. La densidad uniforme de las láminas de aleación de tungsteno garantiza una distribución de masa controlable, evitando que desviaciones localizadas afecten la estabilidad del sistema.

En balanzas analíticas o centrífugas, se utilizan láminas de aleación de tungsteno como pesas o contrapesos. Su espesor uniforme permite un ajuste preciso, y el recubrimiento superficial evita que la oxidación afecte la masa. En instrumentos inerciales, los contrapesos ajustan la inercia rotacional; la maquinabilidad de las láminas de aleación de tungsteno permite geometrías complejas, cumpliendo con los requisitos de miniaturización. Las plataformas de instrumentos ópticos utilizan contrapesos para amortiguar las vibraciones; las láminas de alta densidad bajan el centro de gravedad y mejoran la resistencia a los impactos.

Las láminas de aleación de tungsteno también se han extendido a maquinaria rotatoria de alta velocidad, como giroscopios o rotores de motores, donde el contrapeso reduce la vibración excéntrica y prolonga la vida útil de los rodamientos. Existe una amplia gama de espesores, con láminas delgadas para microdispositivos y láminas más gruesas para ajustes de masas a gran escala. Los tratamientos superficiales, como el dorado, mejoran la apariencia y la resistencia a la corrosión, mientras que la estabilidad química garantiza una calidad constante durante largos periodos. La tecnología de procesamiento influye en la precisión de la aplicación: el corte de precisión garantiza bordes lisos y el aplanamiento térmico mantiene la planitud. El uso de láminas de aleación de tungsteno en contrapesos promueve un diseño mecánico compacto, y la sustitución de materiales tradicionales por alta densidad reduce el volumen. En cuanto a su adaptabilidad ambiental, presenta estabilidad dimensional ante variaciones de temperatura, lo que permite un funcionamiento en un amplio rango de temperaturas.

## 7.3 Aplicaciones de las láminas de aleación de tungsteno en los campos nuclear y médico

de tungsteno en los sectores nuclear y médico se basan principalmente en su alta densidad, excelente capacidad de atenuación de la radiación y biocompatibilidad. Estas aplicaciones abarcan el blindaje de instalaciones nucleares, equipos de radioterapia médica y componentes para entornos nucleares, lo que

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contribuye a lograr protección radiológica y una mayor precisión en los tratamientos. Las láminas de aleación de tungsteno ofrecen la ventaja de un espesor de blindaje efectivo gracias a su alto contenido de tungsteno, lo que resulta en un volumen menor en comparación con los materiales tradicionales, lo que las hace adecuadas para aplicaciones con limitaciones de espacio. En aplicaciones de blindaje nuclear, las láminas de aleación de tungsteno se utilizan en revestimientos de contenedores o estructuras de colimación, mientras que en el sector médico se encuentran con frecuencia en colimadores multilámina y equipos de protección. Los componentes para entornos nucleares aprovechan su estabilidad térmica y tolerancia a la radiación.

El diseño de aplicaciones prioriza la uniformidad del espesor y la suavidad de la superficie; se utilizan láminas delgadas para una colimación precisa, mientras que las láminas más gruesas soportan la estructura. Los tratamientos superficiales, como los recubrimientos, mejoran la resistencia a la corrosión, y las estructuras compuestas combinadas con polímeros amplían la flexibilidad del blindaje. La maquinabilidad de las láminas de aleación de tungsteno permite un moldeado complejo para satisfacer necesidades personalizadas. Con el desarrollo de las tecnologías de medicina nuclear y radioterapia, la aplicación de las láminas de aleación de tungsteno se está expandiendo del blindaje tradicional a la integración funcional, como la combinación con sensores o canales de refrigeración. La biocompatibilidad garantiza la seguridad en aplicaciones médicas, y la estabilidad del tejido bajo radiación facilita su uso a largo plazo.

### 7.3.1 Láminas de aleación de tungsteno para blindaje nuclear

de tungsteno en el blindaje nuclear se deben a su alta capacidad de atenuación de rayos gamma y neutrones. Esta aplicación es común en el revestimiento de contenedores en instalaciones nucleares, las paredes interiores de buques de transporte y el blindaje de equipos experimentales, lo que ayuda a reducir las fugas de radiación y a proteger el entorno operativo. La alta densidad de las láminas de aleación de tungsteno permite un blindaje eficaz con un espesor limitado, lo que se traduce en un ahorro significativo de volumen en comparación con otros materiales y las hace idóneas para diseños modulares. En las estructuras de blindaje, las láminas de aleación de tungsteno se fijan mediante laminación o montaje en espejo, y los tratamientos superficiales mejoran su resistencia a la oxidación por radiación.

En los contenedores de almacenamiento de residuos nucleares, las láminas de aleación de tungsteno sirven como revestimientos para absorber la radiación de alta energía, manteniendo así la estabilidad térmica durante largos periodos. En configuraciones experimentales, como las paredes de blindaje perimetral de reactores, se utilizan placas de aleación de tungsteno, cuyo espesor se ajusta según la intensidad de la radiación; su microestructura uniforme garantiza una atenuación constante. La maquinabilidad de las láminas de aleación de tungsteno permite cortes irregulares, adaptándose a geometrías complejas. En aplicaciones de compuestos, la combinación con materiales de boruro mejora la absorción de neutrones, presentando una buena compatibilidad química y sin reacciones dañinas. Las aplicaciones se extienden a los equipos de procesamiento de combustible nuclear, donde las láminas de aleación de tungsteno protegen las ventanas operativas o los componentes de los brazos robóticos, proporcionando tolerancia a la radiación para soportar exposiciones repetidas. Los recubrimientos

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

superficiales, como el níquel, protegen la fase de unión, prolongando así su vida útil. La función de las láminas de aleación de tungsteno en el blindaje nuclear promueve la miniaturización de las instalaciones, la optimización del peso y la facilidad de transporte. En cuanto a su adaptabilidad ambiental, presentan estabilidad dimensional bajo radiación de alta temperatura.

### 7.3.2 Lámina de aleación de tungsteno para blindaje médico

de tungsteno se utilizan principalmente en blindaje médico en equipos de radioterapia y equipos de protección. Gracias a sus propiedades de atenuación de rayos X y gamma, proporcionan una conformación precisa de la radiación y protección del personal, mejorando el posicionamiento del tratamiento y la seguridad. El ejemplo más típico de blindaje médico son las palas del colimador multilámina de los aceleradores lineales. Las capas de láminas de aleación de tungsteno se apilan y se mueven de forma independiente para formar el perfil del haz. Su espesor uniforme garantiza bordes nítidos y reduce la penumbra.

En equipos de diagnóstico radiológico, como los escáneres CT, se utilizan láminas de aleación de tungsteno en las rejillas de colimación de los detectores o en las placas antidispersión para absorber la radiación dispersa y mejorar la claridad de la imagen. En equipos de protección, como los delantales de radiólogo o las cortinas de blindaje, las láminas de aleación de tungsteno se combinan con polímeros para formar materiales flexibles que ofrecen ligereza y comodidad, en lugar de los materiales pesados tradicionales. La biocompatibilidad y la no toxicidad de las láminas de aleación de tungsteno garantizan un contacto médico seguro.

El diseño de la aplicación prioriza la precisión; las superficies pulidas de las cuchillas reducen la fricción y garantizan un movimiento suave. La estabilidad térmica de las láminas de aleación de tungsteno les permite mantener su forma bajo altas dosis de radiación, mientras que su inercia química previene la corrosión del refrigerante. Los espesores personalizados se adaptan a diferentes energías de radiación: láminas delgadas para rayos X de baja energía y láminas más gruesas para rayos gamma de alta energía. Las estructuras compuestas se extienden a la protección antidesgaste, con microláminas de aleación de tungsteno distribuidas uniformemente que proporcionan una cobertura completa.

### 7.3.3 Láminas de aleación de tungsteno para entornos nucleares

de tungsteno en entornos nucleares aprovechan su resistencia a la radiación y estabilidad termomecánica. Estas aplicaciones se encuentran en componentes internos de instalaciones nucleares, como disipadores de calor, estructuras de soporte o blindaje localizado, lo que contribuye a mantener el funcionamiento fiable de los equipos en condiciones de radiación y alta temperatura. Los componentes del entorno nuclear están sujetos a la radiación neutrónica y gamma, así como a ciclos de temperatura; la estabilidad microestructural de las láminas de aleación de tungsteno reduce la hinchazón y la fragilización, y la fase aglutinante armoniza la distribución de tensiones.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En reactores o aceleradores nucleares, las láminas de aleación de tungsteno se utilizan como placas traseras de objetivos o revestimientos de canales de refrigeración. Su conductividad térmica facilita la disipación del calor y mantiene la estabilidad dimensional bajo radiación. Las estructuras de soporte, como los soportes de montaje, son de alta resistencia para soportar vibraciones y cargas térmicas. La maquinabilidad de las láminas de aleación de tungsteno permite un conformado preciso, lo que las hace ideales para su instalación en espacios reducidos.

Las aplicaciones se extienden a los componentes de instrumentos nucleares, donde las láminas de aleación de tungsteno sirven como absorbedores o ventanas de colimación, combinando la atenuación de la radiación con la gestión térmica. Los tratamientos superficiales mejoran la resistencia a la oxidación y los recubrimientos protegen contra la exposición prolongada. La función de las láminas de aleación de tungsteno en entornos nucleares promueve la durabilidad de los equipos y reduce la frecuencia de mantenimiento. La estabilidad química protege contra las reacciones químicas.

#### 7.4 Aplicaciones de las láminas de aleación de tungsteno en los campos de la electrónica y las nuevas energías

de tungsteno en los campos de la electrónica y las nuevas energías se basan principalmente en su excelente conductividad térmica y eléctrica, coeficiente de expansión térmica equivalente y alta densidad. Estas aplicaciones abarcan la disipación de calor de dispositivos de potencia, el encapsulado electrónico y los materiales de electrodos, lo que ayuda a lograr la miniaturización de dispositivos, alta confiabilidad y conversión eficiente de energía. Las láminas de aleación de tungsteno, a través de sistemas de tungsteno-cobre o tungsteno-níquel-cobre, proporcionan un comportamiento de expansión térmica similar al de los materiales semiconductores, reduciendo el fallo por tensión térmica. En sustratos de disipación de calor, actúan como disipadores de calor para distribuir el calor; en el encapsulado, sirven como carcasas o capas de transición; y en electrodos, proporcionan resistencia a la erosión por arco. Con el rápido desarrollo de la comunicación 5G, la electrónica de alta potencia y las nuevas tecnologías de baterías de energía, la aplicación de las láminas de aleación de tungsteno se ha expandido desde los dispositivos de vacío tradicionales hasta los módulos de alta frecuencia y los sistemas de almacenamiento de energía.

La industria electrónica exige una gestión térmica rigurosa; las láminas de aleación de tungsteno, con su alta conductividad térmica, facilitan la difusión del calor, mientras que los recubrimientos de superficie mejoran la soldabilidad. En aplicaciones de nuevas energías, su estabilidad soporta condiciones cíclicas o de alta temperatura. Las láminas de aleación de tungsteno ofrecen opciones de espesor flexibles, con láminas delgadas utilizadas en microelectrónica y láminas más gruesas que soportan alta potencia. Las estructuras compuestas son comunes, combinándose con cerámica o diamante para mejorar el rendimiento. La aplicación de láminas de aleación de tungsteno también promueve la integración del dispositivo, con materiales de interfaz térmica coincidentes que reducen la resistencia térmica de contacto. En términos de adaptabilidad ambiental, las láminas de aleación de tungsteno mantienen un rendimiento estable en un amplio rango de temperaturas. En resumen, esta aplicación demuestra la función termoeléctrica de las láminas de aleación de tungsteno en nuevas energías electrónicas, impulsando

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



mejoras en la eficiencia y vida útil del dispositivo a través de combinaciones de rendimiento y apoyando los avances tecnológicos continuos en la industria.

#### 7.4.1 Lámina de aleación de tungsteno para sustrato de disipación de calor

de tungsteno en sustratos de disipación de calor aprovechan principalmente la alta conductividad térmica del sistema tungsteno-cobre y su compatibilidad con la expansión térmica de los materiales semiconductores. Esta aplicación es común en LED de alta potencia, láseres y módulos de radiofrecuencia, lo que ayuda a disipar rápidamente el calor y a reducir el agrietamiento por tensión térmica. Como capa intermedia entre el chip y el disipador de calor, la lámina de aleación de tungsteno proporciona una superficie de soporte plana, y el recubrimiento de níquel-oro mejora la soldabilidad y proporciona una alta resistencia de la unión química. En la estructura de pseudoaleación de tungsteno-cobre, la fase de cobre forma canales térmicos continuos, mientras que la estructura de tungsteno controla la expansión, adaptándose a los sustratos de silicio o arseniuro de galio.

En los módulos amplificadores de potencia, los sustratos de aleación de tungsteno soportan el chip. Su conductividad térmica favorece la acumulación y dispersión del calor durante el funcionamiento a alta frecuencia, y su espesor uniforme garantiza la planitud y reduce la deformación. En aplicaciones de diodos láser, el sustrato absorbe el calor de bombeo, y la capacidad térmica de la lámina de aleación de tungsteno amortigua los valores pico instantáneos. En el encapsulado de LED, que se extiende a la iluminación de alta potencia, las láminas de aleación de tungsteno sustituyen a las láminas tradicionales de cobre-molibdeno, ofreciendo una gestión térmica volumétrica superior.

El diseño de aplicaciones prioriza el tratamiento de la interfaz, mediante soldadura fuerte o sinterizada para conectar chips, y la compatibilidad química para evitar capas reactivas. El procesamiento láser de las microestructuras superficiales aumenta el área de contacto y mejora la conductividad térmica. La función de las láminas de aleación de tungsteno en el sustrato de disipación térmica promueve la miniaturización del dispositivo y un funcionamiento fiable a altas densidades de potencia. Las variantes compuestas con partículas de diamante mejoran la conductividad térmica, ampliando aún más los límites. En cuanto a su adaptabilidad ambiental, presenta un rendimiento estable en ciclos de alta y baja temperatura.

#### 7.4.2 Láminas de aleación de tungsteno para embalaje electrónico

Las láminas de aleación de tungsteno se utilizan en encapsulados electrónicos para aprovechar sus propiedades de adaptación a la expansión térmica y alta densidad, sirviendo como carcasas, cubiertas o capas de transición para proporcionar protección hermética y rutas térmicas. Esta aplicación se observa en dispositivos de microondas de alta fiabilidad y encapsulados de sensores, ayudando a mantener un entorno interno de vacío o gas inerte. Las láminas de aleación de tungsteno son compatibles con el sellado de cerámica o vidrio, su estabilidad química permite la soldadura fuerte a alta temperatura y su coeficiente de expansión térmica es cercano al valor normal para reducir la tensión de sellado.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En el encapsulado de semiconductores de potencia, las láminas de aleación de tungsteno sirven como bases o transiciones de marco conductor, alejando el calor de la unión y reduciendo el peso total gracias a su ventaja de densidad. En aplicaciones de encapsulado de tubos de microondas, las placas de cubierta de aleación de tungsteno garantizan el apantallamiento electromagnético, y su alta densidad mejora la rigidez estructural. Las carcasas de los sensores utilizan láminas de aleación de tungsteno para una mayor resistencia a la corrosión ambiental, y los recubrimientos superficiales mejoran la soldabilidad.

#### 7.4.3 Lámina de aleación de tungsteno para electrodos

tungsteno en electrodos aprovechan principalmente su resistencia a la erosión por arco y su alta conductividad. Esta aplicación se observa en interruptores de alta tensión, electrodos de soldadura por resistencia y ciertos tubos de descarga, lo que ayuda a prolongar la vida útil de los contactos y a mantener una conductividad estable. Como superficies de contacto o insertos, la fase de tungsteno resiste la soldadura, mientras que la fase de cobre o plata proporciona una vía conductora. Químicamente, los productos de ablación se volatilizan y eliminan el daño térmico.

En los electrodos de soldadura por resistencia, las láminas de aleación de tungsteno se incrustan en un sustrato de cobre para resistir los impactos repetidos de la soldadura por puntos. Su alta dureza reduce la deformación, mientras que su conductividad soporta altas corrientes. En aplicaciones de interruptores de vacío, el electrodo de aleación de tungsteno se enfrenta al arco eléctrico; su resistencia a la ablación mantiene una superficie de contacto lisa y reduce la transferencia de material.

Las aplicaciones se han ampliado a electrodos para mecanizado por descarga eléctrica. Las láminas de aleación de tungsteno reducen el desgaste y mejoran la eficiencia del procesamiento, mientras que la textura superficial optimizada garantiza una descarga uniforme. Los electrodos para tubos de descarga utilizan aleaciones de tungsteno que resisten la ruptura por alta tensión y su estabilidad permite descargas repetidas.

de tungsteno en los electrodos mejoran la fiabilidad del contacto y la vida útil, mientras que el diseño compuesto equilibra la conductividad y la resistencia al desgaste. El espesor se determina en función del nivel de corriente; las láminas más delgadas proporcionan un contacto preciso, mientras que las más gruesas ofrecen un soporte resistente. El pulido de la superficie reduce la resistencia inicial.

#### 7.5 Aplicación de láminas de aleación de tungsteno en tarjetas

tungsteno en tarjetas aprovechan principalmente su alta densidad, lo que resulta en una sensación de solidez y brillo metálico, además de una excelente procesabilidad y resistencia al desgaste. Esta aplicación combina materiales funcionales con artículos de uso diario, otorgando a las tarjetas una textura y durabilidad únicas. Las láminas de aleación de tungsteno se laminan con precisión en láminas delgadas o capas compuestas, y luego se laminan con sustratos de plástico o metal. El control de espesor garantiza la compatibilidad con los tamaños de tarjeta estándar. Las aplicaciones incluyen tarjetas de pago

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bancarias, etiquetas de identificación para mascotas y tarjetas conmemorativas navideñas, satisfaciendo la demanda de los consumidores de productos de alta gama, personalizados y duraderos.

de tungsteno proporcionan texturas antifalsificación y efectos visuales a las tarjetas. Las superficies pulidas o cepilladas mejoran la estética, mientras que los recubrimientos, como el dorado o el titanio negro, añaden variedad de colores. Su estabilidad química hace que las tarjetas sean resistentes al desgaste diario y la corrosión, manteniendo su brillo durante mucho tiempo. En el proceso compuesto, la capa de aleación de tungsteno se prensa en caliente sobre un sustrato de PVC o PC, con adhesivos que garantizan la resistencia entre capas. La aplicación de aleaciones de tungsteno también facilita diseños de tarjetas ligeros, logrando una sensación de peso sin aumentar el volumen mediante capas delgadas de alta densidad. Con el aumento del consumo, las tarjetas de aleación de tungsteno se han expandido desde artículos de lujo hasta regalos personalizados, con tecnologías de procesamiento como el grabado láser que permiten diseños personalizados. En términos de adaptabilidad ambiental, las tarjetas son resistentes a la flexión y a las altas temperaturas.

### 7.5.1 Tarjetas bancarias y tarjetas de pago de aleación de tungsteno

Las tarjetas bancarias y de pago de aleación de tungsteno son herramientas de pago de alta gama que incorporan láminas delgadas de aleación de tungsteno en su cuerpo. Estas tarjetas ofrecen un peso metálico y una sensación de frescura gracias a la capa de aleación de tungsteno, lo que las distingue de las tarjetas de plástico tradicionales y mejora la sensación de identidad y la experiencia de usuario del titular. La lámina de aleación de tungsteno se enrolla típicamente en una lámina extremadamente fina, se prensa en caliente junto con múltiples capas de sustrato plástico y se recubre con una capa protectora transparente. La inercia química de la aleación de tungsteno garantiza que la tarjeta no se decolore ni se deforme con la fricción y las flexiones diarias. El tamaño estándar de la tarjeta es compatible con los lectores de tarjetas existentes, y el chip y la banda magnética integrados no afectan su funcionalidad.

Las instituciones financieras suelen emitir tarjetas bancarias de aleación de tungsteno como tarjetas de membresía de alta gama o tarjetas negras. Su peso añade un toque de ceremonia al retirarlas, mientras que su brillo metálico realza su atractivo visual. Disponemos de diversos tratamientos de superficie, como texturas cepilladas y pulido espejo, con grabado láser del número y el diseño de la tarjeta, lo que proporciona excelentes características antifalsificación. El grosor de la capa de aleación de tungsteno se ajusta con precisión para equilibrar el peso y la flexibilidad, y las pruebas de flexión garantizan la ausencia de delaminación. Las opciones de recubrimiento químico, como el oro rosa o el bronce de cañón, ofrecen opciones de color que se adaptan a las preferencias individuales.

Las aplicaciones de tarjetas de pago se están expandiendo a los pagos sin contacto. Las aleaciones de tungsteno no interfieren con las señales de radiofrecuencia y el diseño de la capa de antena es compatible. Su resistencia a la abrasión mantiene las tarjetas como nuevas incluso con la fricción de la billetera, y su larga vida útil reduce la frecuencia de reemplazo. La tecnología de procesamiento de las tarjetas de aleación de tungsteno es avanzada, lo que resulta en bordes de corte preciso, lisos y sin rebabas después del laminado. En cuanto a la adaptabilidad ambiental, las tarjetas son resistentes a altas temperaturas y a

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

los agentes de limpieza químicos, lo que las hace aptas para su uso en todo el mundo. La aplicación de aleaciones de tungsteno también avanza en la tecnología antifalsificación de tarjetas; su densidad única las hace difíciles de imitar.

### 7.5.2 Etiqueta de identificación para mascotas de aleación de tungsteno

Las placas de identificación para mascotas de aleación de tungsteno son pequeñas placas fabricadas con láminas delgadas de este material, que se utilizan para identificar a las mascotas por sus collares. Estas placas combinan durabilidad y estética gracias a su alta densidad y textura metálica, resistiendo el desgaste y la corrosión causados por la actividad de las mascotas. Las láminas de aleación de tungsteno se enrollan en láminas delgadas y luego se estampan en diversas formas, como huesos, placas redondas o corazones. La superficie está grabada con láser con la información del propietario y el nombre de la mascota; la dureza química de la aleación de tungsteno garantiza un grabado profundo, duradero y que no se desdibuje.

de etiquetas de identificación para mascotas, la aleación de tungsteno ofrece un peso moderado, minimizando la carga sobre las mascotas, mientras que el diseño del cierre garantiza un ajuste seguro y evita que se desprendan. Las superficies pulidas o cepilladas reflejan la luz, mejorando la visibilidad, y las opciones de chapado, como el rodio negro o el oro, ofrecen una variedad de colores. Su estabilidad química garantiza que la etiqueta se mantenga intacta incluso bajo la lluvia, el barro o las lamidas de las mascotas, sin oxidarse ni decolorarse. Su grosor controlado la hace delgada pero resistente, resistiendo la flexión y el agrietamiento.

La aplicación se ha expandido al mercado de artículos para mascotas de alta gama, con placas de aleación de tungsteno que se utilizan como accesorios de lujo. Estas placas se combinan con collares de cuero y presentan diseños personalizados, como contornos de fotos de mascotas o enlaces a códigos QR. Su durabilidad permite su uso prolongado por parte de mascotas activas, y la información clara facilita su recuperación en caso de pérdida. La mecanización de las placas de aleación de tungsteno permite la personalización en lotes pequeños, y los bordes redondeados evitan lesiones en la piel de la mascota.

### 7.5.3 Tarjetas personalizadas conmemorativas y festivas de aleación de tungsteno

Las tarjetas navideñas y conmemorativas personalizadas de aleación de tungsteno se fabrican con láminas delgadas de este metal y se utilizan como regalos o recuerdos navideños. Estas tarjetas transmiten emociones especiales y un valor coleccionable gracias a su peso metálico y brillo permanente, lo que las distingue de las tarjetas de papel o plástico. Fabricadas con láminas de aleación de tungsteno de metal puro o compuesto, la superficie está grabada con láser con saludos, fechas o diseños. La estabilidad química de la aleación de tungsteno garantiza que la información no se desvanezca, lo que las hace ideales para una conservación a largo plazo.

Para tarjetas navideñas, como cumpleaños, aniversarios o tarjetas de felicitación, la aleación de tungsteno proporciona una sensación de solidez y una agradable sorpresa al retirarla, con colores de baño como el

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



dorado o el plateado que combinan con la temática navideña. Las tarjetas conmemorativas se utilizan para bodas, graduaciones o eventos corporativos, con formas personalizadas como corazones o marcapáginas, y con incrustaciones de piedras preciosas o diseños en relieve que realzan su atractivo artístico. Delgadas pero resistentes, son fáciles de enviar por correo o transportar.

El diseño de la aplicación prioriza la personalización, con tecnología láser que logra texturas finas y pulido químico que proporciona un reflejo de espejo que realza el atractivo visual. La estructura compuesta, combinada con seda o cuero, realza la calidad del regalo. La resistencia al desgaste de la aleación de tungsteno garantiza que las tarjetas mantengan su aspecto impecable tras un uso repetido, lo que les confiere un gran valor de colección.

#### 7.5.4 Señalización de la industria de aleación de tungsteno y gestión de activos

La señalización industrial y de gestión de activos de aleación de tungsteno se fabrica procesando láminas delgadas de aleación de tungsteno para obtener señales duraderas que permiten el marcado permanente de equipos, herramientas o activos. Estas señales resisten el desgaste, la corrosión y las altas temperaturas en entornos industriales gracias a su alta dureza y estabilidad química, lo que garantiza la legibilidad de la información a largo plazo. Tras laminarse en placas delgadas, las láminas de aleación de tungsteno se graban o se estampan con láser con números, códigos de barras o códigos QR. El pulido o cepillado de la superficie mejora la resistencia a la intemperie. La inercia química de la aleación de tungsteno previene la corrosión por ácidos, álcalis o aceites, lo que la hace apta para entornos exteriores o con productos químicos.

En la señalización industrial, las señales de aleación de tungsteno se fijan a maquinaria, tuberías o contenedores, resistiendo la vibración y la limpieza. Su alta densidad proporciona una sensación de estabilidad y se fijan firmemente con cordones o remaches. La señalización de gestión de activos se utiliza en estanterías de almacén o equipos informáticos, con códigos QR que se vinculan a sistemas digitales para el seguimiento y la gestión del inventario. La resistencia al desgaste de la aleación de tungsteno garantiza que las señales se mantengan claras y la información legible incluso con escaneos frecuentes o fricción.

El diseño de la aplicación prioriza la practicidad, con bordes lisos y resistentes a rayones y orificios precisos para un fácil montaje. Delgado pero robusto, resiste la flexión y el agrietamiento, con un cromado negro que mejora la ocultación y la resistencia a las huellas dactilares. Su estabilidad química permite la limpieza con agua a alta presión o con solventes. La maquinabilidad de las placas de identificación de aleación de tungsteno permite la personalización a gran escala, y los patrones con plantillas reducen costos.

#### 7.5.5 Etiquetas de ropa y artículos de lujo de aleación de tungsteno

Las etiquetas colgantes de aleación de tungsteno para ropa y marcas de lujo son etiquetas de moda fabricadas con finas láminas de aleación de tungsteno que se adhieren a prendas, bolsos o joyas.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Confieren a los productos un toque metálico y un posicionamiento de alta gama. Estas etiquetas mejoran la imagen de marca gracias a su peso y brillo, lo que las distingue de las etiquetas tradicionales de plástico o papel. Las láminas de aleación de tungsteno se cortan con precisión en logotipos de marca o formas geométricas, con superficies cepilladas, espejadas o doradas. La dureza química de la aleación de tungsteno garantiza que las etiquetas no se rayen ni se deformen con el uso, manteniendo así su brillo permanente.

En las etiquetas colgantes para ropa, las de aleación de tungsteno se fijan a las prendas mediante finas cadenas o cintas, y su peso transmite lujo. El grabado láser del nombre de la marca o del número de edición limitada realza la exclusividad. Las etiquetas colgantes para bolsos de lujo suelen ser más grandes, con texturas en relieve que aportan un efecto tridimensional, y están chapadas en titanio negro u oro rosa para combinar con la paleta de colores del producto. Las etiquetas colgantes para joyería utilizan aleaciones de tungsteno resistentes a la corrosión, lo que garantiza su conservación a largo plazo junto con las joyas de metales preciosos. El diseño de la aplicación prioriza la estética y la funcionalidad, con bordes redondeados y pulidos y orificios delicadamente elaborados para evitar desgarros y roturas. El grosor, finamente ajustado, equilibra el peso y la suavidad, mientras que la estabilidad química resiste los efectos corrosivos de los perfumes y el sudor. La maquinabilidad de las etiquetas de aleación de tungsteno permite una personalización de alta gama en lotes pequeños, con texturas 3D o incrustaciones de piedras preciosas que realzan su valor artístico.

#### 7.5.6 Tarjetas de presentación y etiquetas sociales de aleación de tungsteno de alta gama

tungsteno se fabrican procesando láminas delgadas de aleación de tungsteno en formato de tarjeta de presentación o tarjeta de regalo para comunicaciones empresariales o eventos sociales. Estas tarjetas transmiten profesionalidad y buen gusto gracias a su peso metálico y su exquisita artesanía, lo que las distingue de las tarjetas de presentación de papel comunes y realza la imagen personal del titular. Las láminas de aleación de tungsteno se laminan al grosor estándar de una tarjeta de presentación y la superficie se graba con láser con el nombre, el cargo y la información de contacto. La dureza química de la aleación de tungsteno garantiza que la tarjeta no se doble ni se desgaste al rozarla con una billetera o un tarjetero, manteniendo un brillo permanente.

En aplicaciones de tarjetas de presentación de alta gama, la aleación de tungsteno ofrece una sensación metálica y moderna que llama la atención al sacarla. El baño, como el bronce o el blanco plateado, combina con un estilo profesional, mientras que la textura cepillada aporta un lujo sutil. Las tarjetas de etiqueta, utilizadas para invitaciones de boda, tarjetas de agradecimiento o invitaciones formales, presentan letras o diseños elegantes, son delgadas pero robustas, y fáciles de enviar por correo o entregar.

El diseño de la aplicación presta atención al detalle, con bordes biselados para evitar rayones y códigos QR que enlazan a sitios web personales o tarjetas de presentación digitales. Su estabilidad química resiste el sudor y las manchas de alcohol, lo que garantiza una información clara y duradera. La maquinabilidad de las tarjetas de aleación de tungsteno permite el grabado a doble cara, una para información y la otra para diseños artísticos, lo que aumenta su valor coleccionable.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Capítulo 8 Problemas comunes y soluciones para láminas de aleación de tungsteno

### 8.1 Problemas fundamentales de los materiales y soluciones de las láminas de aleación de tungsteno

Las láminas de aleación de tungsteno se deben principalmente a desviaciones en la distribución de la composición, la estructura cristalina y las propiedades físicas. Estos problemas pueden afectar la uniformidad, la fiabilidad y la funcionalidad del material durante la producción y la aplicación. La falta de homogeneidad en la composición provoca diferencias localizadas de rendimiento, los defectos estructurales influyen en el comportamiento mecánico y las desviaciones en las propiedades físicas pueden resultar en una mala adaptación a las aplicaciones posteriores. Las soluciones priorizan la optimización y el control del proceso, como la homogeneización de la mezcla, la reparación del tratamiento térmico y el ajuste de parámetros. Las causas de estos problemas suelen estar relacionadas con las características del polvo, la cinética de sinterización y la tensión de procesamiento, y pueden mitigarse eficazmente mediante mecanismos sistemáticos de detección y retroalimentación.

La solución de problemas fundamentales de los materiales requiere una combinación de prevención y corrección, con una gestión estricta de la pureza en la etapa de la materia prima, parámetros refinados en las etapas de conformado y sinterización, y control termomecánico en el posprocesamiento. Los principios químicos guían la solución: la difusión promueve la uniformidad y la restauración reduce los defectos. La flexibilidad en la resolución de problemas permite realizar ajustes según el sistema de aleación; en los sistemas de níquel-hierro, el enfoque se centra en el equilibrio de la resistencia, mientras que en los sistemas de tungsteno-cobre, se prioriza la conductividad térmica. Factores ambientales, como la oxidación desigual inducida por la humedad, pueden agravar los problemas, lo que requiere un secado controlado.

#### 8.1.1 Cuestiones relacionadas con la composición y la estructura

de tungsteno se manifiestan principalmente por una distribución desigual de elementos y defectos cristalinos. Estos problemas afectan el equilibrio bifásico y la unión interfacial de la microestructura, lo que afecta las propiedades macroscópicas. La composición no homogénea se debe a una mezcla de polvos o difusión de sinterización insuficientes, mientras que los defectos estructurales incluyen dislocaciones, porosidad y fases segregadas. Las soluciones se centran en métodos de homogeneización y tratamientos térmicos restauradores, aprovechando los mecanismos de difusión química y recristalización. La detección de problemas se realiza mediante mapeo espectral y observación con microscopía electrónica, lo que permite una intervención temprana para reducir el desperdicio.

La solución de estos problemas también implica la operación coordinada de toda la cadena de proceso: optimizar el polvo en la fase inicial para reducir las desviaciones iniciales, controlar la difusión durante la sinterización intermedia y mitigar los defectos durante el procesamiento final. Los problemas son más pronunciados con las aleaciones con alto contenido de tungsteno, donde es difícil mantener la uniformidad cuando la fase aglutinante es baja. El control ambiental, como la pureza de la atmósfera, también influye en la gravedad de los problemas.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 8.1.1.1 Problemas y métodos de homogeneización de composiciones de aleaciones de tungsteno no homogéneas

tungsteno se deben principalmente a una mezcla insuficiente del polvo, una difusión inadecuada durante la sinterización o una segregación elemental causada por un tamaño de tocho excesivamente grande. Esta irregularidad se manifiesta como un enriquecimiento local de la fase aglutinante o la aglomeración de partículas de tungsteno, lo que afecta la distribución de la densidad y el equilibrio mecánico. Las causas del problema son evidentes en la etapa de mezcla, donde las diferencias en el tamaño de las partículas de polvo o las descargas electrostáticas provocan la separación. Durante la sinterización, el flujo irregular de la fase líquida agrava la segregación, y las diferencias en las velocidades de difusión de los elementos aglutinantes químicos amplifican el gradiente.

El método de homogeneización mejora primero la mezcla del polvo, empleando molienda de bolas de alta energía o secado por aspersión para la prealeación, lo que promueve la microdistribución de elementos. Durante la sinterización, un tiempo de retención prolongado o un control de temperatura segmentado impulsan la migración de elementos mediante difusión química, optimizando el flujo de la fase líquida para lograr uniformidad. El postratamiento de prensado isostático en caliente aplica presión anisotrópica para acelerar la eliminación de celdas cerradas y la homogeneización por difusión. El recocido homogeneiza aún más el polvo, y la retención prolongada al vacío permite ajustar el tratamiento de la solución.

En la práctica, las palanquillas grandes se combinan con hornos de calentamiento multizona para reducir los gradientes de temperatura, mientras que las palanquillas pequeñas se agitan para mejorar la convección. La detección química, como la espectroscopia de energía dispersiva (EDS), verifica las regiones no homogéneas y guía la iteración de parámetros. Las medidas preventivas incluyen el pretratamiento del polvo para eliminar aglomerados y ajustar las proporciones para equilibrar la fluidez.

Este problema es común en aleaciones con alto contenido de tungsteno. La homogeneización mejora la unión interfacial y reduce las desviaciones de rendimiento. Almacene el polvo en un ambiente seco para evitar la absorción y separación de humedad. Variantes como la aleación mecánica permiten una prehomogeneización completa.

#### 8.1.1.2 Tipos de defectos en la estructura cristalina y estrategias de reparación

de tungsteno presentan dislocaciones, porosidad, segregación en el límite de grano y precipitados anormales. Estos defectos se originan por la tensión de procesamiento y una sinterización imperfecta, lo que afecta la resistencia, la tenacidad y la estabilidad térmica. Los defectos de dislocación se acumulan debido al endurecimiento por laminación, la porosidad se debe a la sinterización residual y a una densidad insuficiente, la segregación en el límite de grano provoca el enriquecimiento de impurezas y los precipitados presentan un tamaño anormal o una distribución irregular. Químicamente, los defectos alteran el período reticular y reducen la energía de enlace.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



La estrategia de reparación emplea principalmente un tratamiento térmico, que incluye recocido al vacío para liberar dislocaciones, aniquilación o reordenamiento por difusión química y un período de espera para restaurar el sistema de deslizamiento. La reparación de poros implica el cierre a alta presión mediante prensado isostático en caliente, seguido de densificación tras la expulsión de gas. La segregación de los límites de grano se soluciona purificando las materias primas para reducir la fuente, seguida de homogeneización a alta temperatura y dilución por difusión. Los precipitados anormales se tratan mediante enfriamiento rápido y solidificación para mantener la homogeneidad, o mediante envejecimiento para controlar el tamaño.

En las estrategias de aplicación, los defectos de laminado en frío suelen repararse por etapas mediante recocido intermedio, mientras que los defectos de sinterización se corrigen mediante post-presurización. Se utilizan atmósferas químicas de vacío para prevenir la aparición de nuevos defectos. La microscopía electrónica se utiliza para observar los tipos de defectos y guiar la selección de la estrategia. El forjado multidireccional se utiliza para prevenir dislocaciones direccionales.

### 8.1.2 Problemas con las desviaciones de las propiedades físicas en láminas de aleación de tungsteno

de tungsteno presentan principalmente anomalías en la densidad y dureza, así como desajustes entre la conductividad térmica y la expansión. Estas desviaciones se deben a fluctuaciones del proceso y diferencias de composición, lo que afecta la compatibilidad y la fiabilidad de las aplicaciones. Las desviaciones de densidad se deben a una sinterización irregular, una dureza anormal debido a un endurecimiento por acritud o recocido insuficiente, una baja conductividad térmica debido a la segregación de la fase líquida y un desajuste de la expansión debido a un desequilibrio en la relación de fases del aglutinante.

La solución se centra en la estabilidad de los parámetros y el posajuste, con corrección de la densidad mediante compensación de presión, control de la dureza mediante tratamiento térmico y optimización de la relación de expansión de la conductividad térmica. La detección de problemas implica el promediado de mediciones multipunto para rastrear los pasos del proceso.

#### 8.1.2.1 Causas y técnicas de ajuste para densidad y dureza anormales

de tungsteno se deben principalmente a una sinterización insuficiente o a una deformación irregular durante el procesamiento. La baja densidad produce porosidad residual, mientras que la alta dureza se debe a la acumulación durante el trabajo en frío o el sobrecocido. Químicamente, esto provoca la interrupción de la fase continua en la porosidad y el endurecimiento de las dislocaciones que fijan los límites de grano. Las causas se remontan a la segregación mixta, que genera diferencias locales en la fase líquida y desviaciones amplificadas en la ventana de temperatura de sinterización.

El ajuste de la densidad técnica se centra en el prensado isostático en caliente para lograr la densidad, mientras que el tratamiento de celda cerrada a alta presión mejora la uniformidad. La dureza anormal se corrige mediante recocido o endurecimiento por envejecimiento, utilizando la difusión química o el

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

equilibrio de precipitación para su recuperación. Las palanquillas de baja densidad se someten a sinterización secundaria, mientras que las de alta dureza se someten a recocido intermedio para su clasificación.

En aplicaciones técnicas, se utilizan reparaciones de presión múltiple para corregir la densidad anormal en palanquillas grandes, mientras que se realizan ajustes finos en el proceso de laminación para piezas más pequeñas a fin de mejorar la dureza. El análisis químico se emplea para evaluar el grado de anomalía en la pérdida de peso o la indentación. Este proceso ayuda a prevenir problemas relacionados con la uniformidad del polvo y la estabilidad de los parámetros.

#### **8.1.2.2 Problemas y esquemas de optimización respecto al desajuste entre la conductividad térmica y la expansión térmica**

La discrepancia entre la conductividad térmica y la expansión térmica de las láminas de aleación de tungsteno se debe a un desequilibrio en la distribución o proporción de la fase aglutinante. Una baja conductividad térmica indica una fase de cobre discontinua, mientras que una alta expansión indica un exceso de aglutinante. Químicamente, la conductividad térmica depende del transporte electrón-fonón, que está determinado por el volumen de la fase expandida. El problema surge de un flujo de sinterización desigual o de una dosificación incorrecta.

La conductividad térmica optimizada se mejora mediante la infiltración de cobre o la sinterización activada para crear canales de flujo químico continuos y uniformes. El desajuste de expansión se soluciona ajustando la relación de enlace de tungsteno, y la sustitución parcial de molibdeno afina el coeficiente. El tratamiento térmico homogeneiza la distribución y el recocido facilita la difusión en la interfaz.

En la aplicación de esta solución, la conductividad térmica del sistema tungsteno-cobre se optimiza tras la fusión e infiltración, seguida del laminado para enderezar el canal. La expansión del sistema níquel-hierro se controla mediante recocido para su liberación. El grado de compatibilidad entre el medidor de conductividad térmica y el dilatómetro se verifica mediante pruebas optimizadas.

### **8.2 Problemas y soluciones en la producción y fabricación de láminas de aleación de tungsteno**

de tungsteno se centran principalmente en optimizar toda la cadena de suministro, desde las materias primas hasta los productos terminados. Estos desafíos incluyen desviaciones en los procesos de pulvimetalurgia, inestabilidad en el laminado y dificultades en la inspección y el control de calidad. Las soluciones se logran mediante ajustes de los parámetros del proceso, mejoras en los equipos y mecanismos de retroalimentación de calidad. Los problemas de fabricación a menudo se deben a propiedades del material, como el alto punto de fusión del tungsteno y el comportamiento de difusión de los elementos de aleación, lo que provoca una microestructura irregular o fluctuaciones en el rendimiento. Las soluciones priorizan una combinación de prevención y corrección: el control de la purificación en la etapa de polvo reduce los defectos iniciales; el diseño de pasadas en la etapa de laminado alivia la

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

acumulación de tensiones; y se utilizan múltiples métodos en la etapa de inspección para mejorar la precisión. La solución de los problemas de fabricación también implica la ingeniería de sistemas, la interconexión de la cadena de procesos, la solución de problemas iniciales en la etapa final y la retroalimentación desde la etapa final para mejorar la etapa inicial. La alta densidad de las láminas de aleación de tungsteno agrava problemas como grietas o desviaciones en la producción de láminas delgadas, lo que requiere una gestión meticulosa. Factores ambientales como la temperatura y la humedad afectan la estabilidad de la fabricación y requieren un control constante.

## 8.2.1 Problemas con los procesos de pulvimetalurgia

Los problemas en los procesos de pulvimetalurgia se manifiestan principalmente como defectos en la preparación del polvo y fallos en el proceso de sinterización. Estos problemas afectan la calidad de la palanquilla y la microestructura final de la lámina, y pueden resolverse identificando las causas y mejorando el proceso. Los defectos en la preparación del polvo se deben a una reducción desigual o a la introducción de impurezas, mientras que los fallos en la sinterización están relacionados con el control de la temperatura y la gestión de la atmósfera. El diagnóstico de problemas requiere una combinación de análisis químico y observación microscópica, y las estrategias de mejora incluyen la optimización de parámetros y tecnologías auxiliares.

La solución de los problemas del proceso se centra en pasos fundamentales: la purificación del polvo reduce las fuentes de defectos y la homogeneización de la sinterización mejora la densidad. La naturaleza refractaria de las aleaciones de tungsteno agrava los problemas a altas temperaturas, lo que requiere un control preciso. El control de la limpieza ambiental previene la contaminación externa.

### 8.2.1.1 Identificación y medidas de control de defectos en la preparación de polvos

Las medidas de identificación y control de defectos en la preparación de polvos se centran principalmente en la pureza, el tamaño de partícula y la morfología del polvo de tungsteno y de elementos de aleación. Estos defectos, como la aglomeración, el enriquecimiento de impurezas o una distribución granulométrica amplia, pueden provocar una mezcla desigual y porosidad de sinterización. La identificación de defectos se logra detectando la distribución con un analizador láser de tamaño de partícula, observando la morfología con un microscopio electrónico de barrido y analizando las impurezas mediante análisis espectral. Químicamente, impurezas como el oxígeno o el carbono permanecen durante la reducción, mientras que las irregularidades en el tamaño de partícula se deben a fluctuaciones de temperatura.

Los defectos se identificaron durante la reducción de óxido de tungsteno con hidrógeno. La eliminación insuficiente del vapor de agua a bajas temperaturas generó residuos de oxígeno, que crecieron de forma anormal a altas temperaturas, formando un polvo grueso. El arrastre de gas durante la atomización del polvo de aleación provocó la formación de poros. Tras la identificación y clasificación, los defectos morfológicos se observaron claramente como partículas aglomeradas al microscopio electrónico, con picos espectrales de impurezas prominentes.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las medidas de control optimizan primero los parámetros de reducción mediante un control de temperatura por etapas para refinar el tamaño de las partículas, el ajuste del flujo de hidrógeno para regular la concentración de vapor de agua y el empleo de agentes reductores químicos para reducir los niveles de oxígeno. El tamizado y la clasificación por flujo de aire eliminan las partículas anormales, mientras que la molienda de bolas activa y desintegra los aglomerados. Un horno de desoxigenación con hidrógeno de pretratamiento purifica el gas, reduciendo las impurezas originales. El almacenamiento del polvo incluye el secado, el sellado con gas inerte y la prevención de la oxidación y la aglomeración.

En esta aplicación, se utiliza polvo de tungsteno de alta pureza para controlar la recristalización multietapa de precursores de tungstato de amonio, mientras que el polvo de aleación se prepara mediante un método carbonílico para lograr una pureza fina. Se monitorizan los parámetros iterativos y se aplica retroalimentación para asegurar una mezcla uniforme tras reducir la distribución del tamaño de partícula. La limpieza química y el lavado ácido eliminan las impurezas superficiales, seguidas del secado y el tamizado.

#### 8.2.1.2 Diagnóstico de fallas en el proceso de sinterización y mejora del proceso

El diagnóstico y la mejora de los procesos de sinterización se centran principalmente en problemas como la porosidad por subsinterización, el engrosamiento por sobresinterización y la segregación por deformación. Estos fallos afectan la densidad y la uniformidad de la estructura de la palanquilla. El diagnóstico se realiza mediante el registro de la temperatura, la medición de la densidad y la observación metalográfica. Las causas de los fallos se reflejan en la desviación de la ventana de temperatura, la reorganización insuficiente de la fase líquida en la subsinterización, el exceso de fase líquida en la sobresinterización, que provoca el crecimiento de partículas, y la alta humedad atmosférica, que provoca inclusiones de oxidación.

Los métodos de diagnóstico incluyen el análisis de los perfiles de temperatura del horno para detectar desviaciones, la observación de la distribución de la porosidad en secciones metalográficas y la comprobación de la segregación mediante gradientes de densidad. El análisis químico de los residuos volátiles confirma la presencia de impurezas y disfunciones.

Las mejoras del proceso comienzan con el ajuste de la ventana de temperatura, la optimización del período de liquidus mediante calentamiento y mantenimiento segmentados, y el uso de aditivos químicos para extender dicha ventana. Las mejoras atmosféricas incluyen el control del punto de rocío y un flujo mejorado, lo que reduce la oxidación mediante la eliminación del vapor de agua. El prensado isostático en caliente corrige los defectos de sinterización, y la construcción de celdas cerradas a alta presión mejora la densificación. Las mejoras en la carga del horno incluyen la suspensión vertical o el soporte de lecho de arena para reducir la deformación. En las aplicaciones, la sinterización de aleaciones de alta densidad se mejora mediante el prensado en caliente integrado, con ajuste fino de parámetros tras el diagnóstico. La mayor pureza química y la predegasificación reducen los defectos de gas. Variantes como la sinterización al vacío sustituyen el hidrógeno para solucionar los problemas de vapor de agua.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 8.2.2 Problemas de laminado y conformado

Los problemas de laminado y conformado incluyen principalmente grietas en el laminado en caliente y deformación inestable durante el trabajo en frío. Estos problemas afectan la integridad y la uniformidad del espesor de la chapa y pueden resolverse mediante análisis causal y métodos de control. Las grietas en el laminado en caliente se originan por la concentración de tensiones, mientras que la deformación en frío provoca la acumulación de endurecimiento. El diagnóstico implica la observación de la superficie y la sección transversal, la mejora del diseño de pasadas y el recocido. La resolución de problemas se centra en la coordinación de la deformación, la prevención de la presión lateral durante el laminado en caliente y la liberación de tensiones durante el recocido durante el trabajo en frío. La alta dureza de las aleaciones de tungsteno agrava el problema en el laminado de chapa fina. El control de la temperatura ambiental afecta a la deformación.

#### 8.2.2.1 Causas y métodos de prevención de grietas por laminación en caliente

Las principales causas de la formación de grietas en el laminado en caliente son la concentración de tensiones a alta temperatura y una microestructura irregular. Las grietas se originan y se propagan desde el borde o la superficie. Químicamente, la tensión es alta en las interfaces débiles, lo que agrava la fragilidad de las partículas de tungsteno. Las causas se pueden atribuir a la porosidad o segregación de la palanquilla, y cuando la reducción por laminación es grande, la tensión supera la tenacidad.

Los métodos de prevención optimizan primero la sinterización de la palanquilla para lograr densidad y reducir los defectos iniciales. El proceso de laminación implica una reducción gradual, con pequeñas reducciones iniciales para el conformado inicial y el ajuste posterior. La lubricación química y los recubrimientos de alta temperatura reducen la tensión por fricción. Los rodillos guía laterales restringen la forma de la chapa y previenen la tensión de tracción en los bordes. El calentamiento intermedio garantiza una temperatura uniforme y restaura la plasticidad. En la práctica, se utilizan aleaciones de alta densidad para el laminado preventivo de revestimientos, aislando el aire y amortiguando la tensión. Se diagnostica y observa la morfología de las grietas; las grietas superficiales se abordan ajustando la lubricación y las grietas internas mejorando la calidad de la palanquilla. Las variaciones incluyen el laminado en caliente, que reemplaza algunos procesos de laminado en caliente.

#### 8.2.2.2 Análisis y control de la deformación por trabajo en frío

El análisis y control de la deformación por trabajo en frío se centra principalmente en la acumulación de endurecimiento y la deformación, que afectan la precisión del espesor y la calidad superficial. El análisis se realiza mediante curvas de tensión y observación metalográfica. Las causas se manifiestan en la multiplicación de dislocaciones; químicamente, la fase aglutinante tiene una plasticidad limitada y las partículas de tungsteno impiden la deformación, lo que genera deformaciones localizadas.

Los métodos de control de la deformación incluyen reducciones de pasadas pequeñas y frecuentes, recocido intermedio para liberar el endurecimiento y difusión química para restaurar el deslizamiento.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La aplicación uniforme de lubricante reduce la deformación por fricción. El control de la tensión estabiliza la forma de la lámina y previene las ondas centrales y de borde. Los ajustes del proceso de laminación se realizan después del análisis; el recocido se incrementa cuando el endurecimiento es alto. En el control de la aplicación, la deformación de láminas delgadas se controla mediante laminación cruzada para garantizar una distribución uniforme de la tensión. La alta pureza química reduce las impurezas y las dislocaciones por fijación. Las variaciones incluyen la unión en caliente y en frío.

### 8.2.3 Cuestiones de inspección y control de calidad

Los problemas de inspección y control de calidad incluyen principalmente desafíos en los ensayos no destructivos (END) y desviaciones de tolerancia dimensional. Estos problemas afectan la precisión de la aceptación y aplicación del producto terminado. Las soluciones se logran mediante métodos alternativos y mejoras tecnológicas. Los desafíos de los END incluyen la interferencia de la matriz y las desviaciones dimensionales debido a las fluctuaciones del procesamiento. El control se centra en la monitorización en línea y los ajustes de retroalimentación. La resolución de problemas enfatiza el uso combinado de múltiples métodos, reemplazando el muestreo destructivo con soluciones de END y utilizando equipos de precisión para corregir las desviaciones dimensionales. La alta densidad de las aleaciones de tungsteno dificulta los ensayos en láminas delgadas. La calibración ambiental también afecta la precisión.

#### 8.2.3.1 Desafíos y soluciones alternativas en la aplicación de la tecnología de ensayos no destructivos

Los principales desafíos en la aplicación de técnicas de ensayos no destructivos (END) residen en la alta densidad del tungsteno, que dificulta la penetración de los rayos X y la atenuación de las ondas ultrasónicas. Estos desafíos dificultan la identificación de defectos internos como poros o grietas, y los gradientes de densidad química interfieren con la señal. Estos problemas son más pronunciados en secciones gruesas, mientras que las secciones delgadas experimentan una mayor interferencia superficial.

La solución alternativa combina la tomografía computarizada (TC) de rayos X para ajustar la penetración de energía y una alta pureza química para reducir el ruido de fondo. La tecnología de ultrasonidos de matriz en fase optimiza el enfoque del haz, reemplazando las sondas tradicionales. La detección por corrientes de Foucault se utiliza para detectar grietas superficiales, y el polvo magnético facilita la detección de aleaciones magnéticas. La solución combina el examen interno con rayos X y la compensación ultrasónica.

#### 8.2.3.2 Manejo de desviaciones de tolerancia dimensional y mejora de la precisión

La gestión y la mejora de la precisión de las desviaciones de tolerancia dimensional se centran principalmente en las desviaciones de espesor, anchura o planitud causadas por fluctuaciones de laminación y efectos térmicos. Estas desviaciones se deben a una presión de laminación inestable y una liberación de tensión desigual en cada pasada, así como a diferencias amplificadas en la expansión térmica en términos químicos.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los métodos de procesamiento incluyen medición y retroalimentación en línea para ajustar la separación entre rodillos, y compensación automática mediante el laminador de precisión. La nivelación en caliente corrige la deformación y el recocido químico libera la tensión residual. La precisión se mejora mediante un sistema de rodillos de alta rigidez y control de tensión para reducir la deformación elástica.

En aplicaciones donde las desviaciones de chapa fina se ajustan en tiempo real mediante medición láser, el forjado de chapa gruesa permite rectificar para compensar las tolerancias preexistentes. La alta pureza química reduce las desviaciones por efecto térmico. Entre las variantes se incluye el laminado CNC.

### 8.3 Aplicación, problemas de rendimiento y soluciones de láminas de aleación de tungsteno

Las láminas de aleación de tungsteno se centran principalmente en su rendimiento práctico en diversos campos. Estos problemas incluyen la fatiga por alta temperatura, la vibración y los impactos, la eficiencia del blindaje, la biocompatibilidad, la conductividad eléctrica y el magnetismo, y la corrosión y la oxidación. Las soluciones se logran mediante el análisis de mecanismos, la optimización del diseño y la modificación de materiales. Los problemas de aplicación a menudo surgen de la discrepancia entre las condiciones ambientales y las propiedades del material. El fallo por fatiga es común en entornos de alta temperatura; debe considerarse la degradación de la eficiencia del blindaje contra la radiación, y la conductividad eléctrica anormal en dispositivos médicos electrónicos puede afectar su funcionalidad. La solución de problemas de rendimiento enfatiza la prevención y la corrección, la investigación de mecanismos para guiar el diseño y las técnicas de modificación para mejorar la adaptabilidad.

La naturaleza sistemática de la resolución de problemas se refleja en intervenciones multiescala, que abarcan desde ajustes microestructurales hasta recubrimientos protectores macroscópicos. Las aplicaciones aeroespaciales priorizan la resistencia a la fatiga y a los impactos, el blindaje radiológico se centra en la recuperación de la eficiencia y las mejoras de seguridad, mientras que las aplicaciones electrónicas y médicas priorizan la estabilidad de la conductividad y la resistencia a la corrosión. La estructura bifásica de las láminas de aleación de tungsteno desempeña un papel importante en esta solución, ya que las partículas de tungsteno proporcionan un soporte rígido y la fase aglutinante modula la tenacidad. Factores ambientales como los ciclos de temperatura o la amplificación de la exposición al medio requieren soluciones específicas.

#### 8.3.1 Problemas de aplicación de las láminas de aleación de tungsteno en la industria aeroespacial

de tungsteno en la industria aeroespacial se ven sometidas a fatiga y cargas de vibración/choque en entornos de alta temperatura. Estos problemas afectan la estabilidad a largo plazo y la integridad estructural de los materiales, y se mitigan mediante tratamientos de refuerzo y un diseño resistente a impactos. Los componentes aeroespaciales están sometidos a tensiones térmicas y cargas mecánicas repetidas, y las láminas de aleación de tungsteno, utilizadas como contrapesos o materiales de gestión térmica, deben afrontar estos desafíos. El análisis de problemas se centra en la identificación de mecanismos y la optimización del diseño; la fatiga a alta temperatura se debe a la acumulación de daños microscópicos, mientras que la vibración/choque se relaciona con la propagación de ondas de tensión.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La solución de problemas de aplicación también implica la selección de materiales y la mejora de procesos. Las aleaciones de tungsteno ofrecen un equilibrio entre densidad y módulo para aplicaciones aeroespaciales, pero los entornos hostiles requieren soluciones a medida. Los sistemas de tungsteno-níquel-hierro son comunes en componentes aeroespaciales, donde la fase aglutinante coordina la deformación. Las pruebas de simulación ambiental orientan las soluciones, y las pruebas de fatiga acelerada evalúan la vida útil.

#### 8.3.1.1 Mecanismo y tratamiento de refuerzo de fallas por fatiga a alta temperatura

El mecanismo de falla por fatiga a alta temperatura se debe principalmente a la evolución de daños microscópicos bajo cargas termomecánicas repetidas. En láminas de aleación de tungsteno, este mecanismo se manifiesta como deslizamiento del límite de grano, ascenso de dislocaciones e inicio y propagación de microfisuras. Químicamente, la segregación elemental en la interfaz reduce la resistencia de la unión, y la concentración de tensiones alrededor de las partículas de tungsteno induce daños. El proceso se desarrolla en fases: inicialmente, las dislocaciones se multiplican para formar bandas persistentes; en la etapa intermedia, los microporos se fusionan; y en la etapa posterior, las grietas se propagan rápidamente hasta la fractura. Los ciclos térmicos exacerbaban el mecanismo, ya que la expansión desigual genera tensión térmica y la formación de capas de óxido debilita aún más la superficie.

Los tratamientos de refuerzo implican primero el diseño de la aleación, el dopaje con tierras raras o carburos para dispersar y fijar los límites de grano, y el control químico de los elementos segregantes para reducir la tasa de deslizamiento y elevar el umbral de fatiga. El tratamiento térmico, el tratamiento en solución y el envejecimiento precipitan las fases finas, lo que refuerza la tenacidad de la fase aglutinante, a la vez que se controla la ventana de temperatura del tratamiento para evitar el engrosamiento. El refuerzo superficial, como la implantación iónica de nitrógeno o carbono, forma una capa de gradiente, y la difusión química mejora la dureza superficial y amortigua la propagación de grietas.

En aplicaciones de procesamiento, el recocido multipaso restaura la microestructura, y la gestión de la pureza química reduce el daño inducido por impurezas. La verificación del mecanismo implica ensayos de fatiga para simular ciclos y observar las características de fractura para realizar ajustes. Variaciones como el laminado superficial introducen tensión de compresión para contrarrestar la fatiga por tracción.

#### 8.3.1.2 Problemas con cargas de vibración y choque y diseño resistente a choques

El principal problema con la vibración y las cargas de impacto reside en el daño localizado causado por la propagación de las ondas de tensión. En las láminas de aleación de tungsteno, esto se manifiesta como la iniciación y propagación de microfisuras, la concentración de tensiones en interfaces químicamente débiles y la amplificación del efecto del impacto debido a la fragilidad de las partículas de tungsteno. La causa es la superposición de la resonancia de la frecuencia de vibración y la alta carga de impacto instantánea, junto con una amortiguación insuficiente del material para absorber la energía, lo que provoca una fatiga acelerada.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



El diseño resistente a impactos optimiza primero la estructura compuesta, laminando láminas de aleación de tungsteno con polímeros y utilizando aglutinantes químicos para amortiguar las ondas de choque. El diseño incorpora control de textura, con fibras orientadas que mejoran la resistencia direccional. Los recubrimientos superficiales, como los polímeros elásticos, absorben energía, mientras que la compatibilidad química garantiza una adhesión estable.

En aplicaciones de diseño, las pruebas de vibración simulada evalúan el problema y ajustan la distribución del espesor para dispersar la tensión. El análisis de mecanismos y el modelado de elementos finitos predicen los puntos de daño, guiando el engrosamiento o el refuerzo. Variantes como el diseño de densidad de gradiente proporcionan una absorción gradual. En resumen, los problemas de vibración y cargas de impacto, así como el diseño resistente al impacto, incorporan estrategias de ingeniería de respuesta dinámica. Mediante la optimización del amortiguador, se mejora la resistencia a la vibración de las láminas de aleación de tungsteno, lo que contribuye a la estabilidad en aplicaciones aeroespaciales. Mediante mejoras de diseño, se mitiga gradualmente el daño por impacto, lo que mejora la fiabilidad de los materiales en entornos de vibración.

### 8.3.2 Cuestiones relacionadas con la aplicación de láminas de aleación de tungsteno en el blindaje contra la radiación

tungsteno utilizadas en el blindaje radiológico presentan problemas de degradación de la eficiencia y biocompatibilidad. Estos problemas afectan la eficacia del blindaje y su uso seguro, y pueden resolverse mediante la recuperación de la eficiencia y mejoras en la seguridad. En aplicaciones de blindaje radiológico, las láminas de aleación de tungsteno, utilizadas como colimadores o capas protectoras, deben soportar la exposición prolongada a la radiación. La degradación de la eficiencia se debe a cambios estructurales, mientras que los problemas de biocompatibilidad se relacionan con reacciones superficiales.

La resolución de problemas de aplicación prioriza la estabilidad del material y la optimización de la protección. La alta densidad del tungsteno proporciona una ventaja de espesor en el blindaje, pero se requieren soluciones específicas para diferentes entornos de radiación. Los sistemas de tungsteno-níquel-cobre son comunes en el blindaje, y su naturaleza no magnética facilita la compatibilidad médica. Las pruebas de simulación ambiental guían las soluciones, y las pruebas de dosis de radiación evalúan los cambios.

#### 8.3.2.1 Razones para la atenuación de la eficiencia del blindaje y la recuperación de la eficiencia

La principal causa de la disminución de la eficiencia del blindaje reside en cambios estructurales inducidos por la radiación, como el hinchamiento, la formación de porosidad y las transiciones de fase. En las láminas de aleación de tungsteno, estos cambios se manifiestan como una disminución de la densidad y fluctuaciones en el coeficiente de atenuación. Químicamente, los átomos desplazados por la radiación generan cúmulos de vacantes, y el daño en la interfaz amplifica la dispersión. Las causas y los procesos dependen de la dosis; las dosis bajas producen defectos microscópicos y deformaciones macroscópicas de dosis medias a altas.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La recuperación de la eficiencia se logra primero mediante tratamiento térmico para reparar defectos, difusión química para reparar las vacantes y temperatura de recocido controlada para evitar la precipitación de la fase secundaria. Un recubrimiento protector de la superficie bloquea la radiación incidente y una capa químicamente inerte absorbe la energía. Durante el proceso de recuperación, se añaden estabilizadores para fijar los defectos y reducir la hinchazón.

#### 8.3.2.2 Evaluación de riesgos de biocompatibilidad y mejora de la seguridad

La evaluación y las mejoras de seguridad para los riesgos de biocompatibilidad se centran principalmente en la liberación superficial y las reacciones tisulares. En las láminas de aleación de tungsteno, estos riesgos se manifiestan como una disolución limitada de los elementos aglutinantes y, químicamente, los iones de níquel o cobre pueden inducir alergias. La evaluación se realiza mediante pruebas de lixiviación y de compatibilidad celular. Las causas de estos riesgos incluyen la oxidación o abrasión superficial, que expone la fase activa. Las mejoras de seguridad comienzan con la pasivación superficial para formar una película de óxido estable, seguida de anodizado químico o recubrimiento para bloquear la migración iónica. Los criterios de evaluación incluyen pruebas biológicas de adhesión celular y tasas de proliferación, así como mejoras en la formulación para reducir la proporción de elementos activos.

#### 8.3.3 Problemas de aplicación de las láminas de aleación de tungsteno en dispositivos electrónicos y médicos

de tungsteno utilizadas en dispositivos electrónicos y médicos presentan anomalías en la conductividad eléctrica y el magnetismo, así como corrosión y oxidación. Estos problemas afectan la estabilidad de la conductividad y la vida útil del dispositivo, y pueden solucionarse mediante la resolución de problemas, modificaciones y recubrimientos protectores. En aplicaciones médicas electrónicas, las láminas de aleación de tungsteno, utilizadas como disipadores de calor o blindaje, deben abordar las fluctuaciones de conductividad y la oxidación. Las anomalías se originan por impurezas o cambios en la superficie, mientras que la corrosión está relacionada con la erosión del medio.

La resolución de problemas de aplicación se centra en los mecanismos de diagnóstico y la optimización del recubrimiento. Los sistemas de tungsteno-cobre son comunes en electrónica y presentan una buena conductividad térmica y eléctrica. Las pruebas ambientales orientan las soluciones, y las pruebas de corrosión aceleran la evaluación de los cambios. En resumen, esta resolución de problemas de aplicación demuestra la estabilidad del material en los procesos electroquímicos, respalda el rendimiento fiable de las láminas de aleación de tungsteno en dispositivos mediante esquemas de modificación y promueve avances tecnológicos en el campo de los dispositivos médicos electrónicos.

##### 8.3.3.1 Investigación de la conductividad eléctrica y anomalías magnéticas y modificación de materiales

Las causas de las anomalías de conductividad eléctrica y magnéticas residen principalmente en la introducción de impurezas y fluctuaciones en la composición de fases. En las láminas de aleación de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno, estos factores se manifiestan como la interrupción de los canales conductores o la magnetización accidental. Químicamente, las impurezas de oxígeno forman una capa aislante, y la segregación de elementos de hierro genera dominios magnéticos. La investigación de anomalías se realiza mediante mediciones de resistencia y curvas de histéresis para localizar impurezas o regiones de segregación.

La modificación del material comienza con la purificación de las materias primas para reducir el oxígeno y el hierro mediante un pretratamiento de reducción química. Posteriormente, la aleación modificada se modifica ajustando la proporción de cobre para mejorar la conductividad, y el dopaje con molibdeno debilita el magnetismo. La limpieza de la superficie restaura la conductividad y el pulido químico elimina la oxidación.

### 8.3.3.2 Tecnología de protección y recubrimiento para problemas de corrosión y oxidación

Las tecnologías de protección y recubrimiento contra la corrosión y la oxidación se centran principalmente en la erosión del medio y la oxidación del aire. Estos problemas se manifiestan como picaduras superficiales y degradación del rendimiento en láminas de aleación de tungsteno, donde la fase aglutinante reacciona preferentemente para formar una capa porosa. Las causas son la humedad ambiental o la exposición al oxígeno a altas temperaturas.

La tecnología de recubrimiento protector consiste primero en el recubrimiento químico de níquel-fósforo para formar una película densa, seguido de una reacción química autocatalítica para lograr una cobertura uniforme. El proceso de recubrimiento consiste posteriormente en el recubrimiento al vacío con cromo-nitrógeno o DLC para mejorar la dureza y la inercia. El pretratamiento protector pasiva la superficie y la película de óxido estabiliza el sustrato.



CTIA GROUP LTD Láminas 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

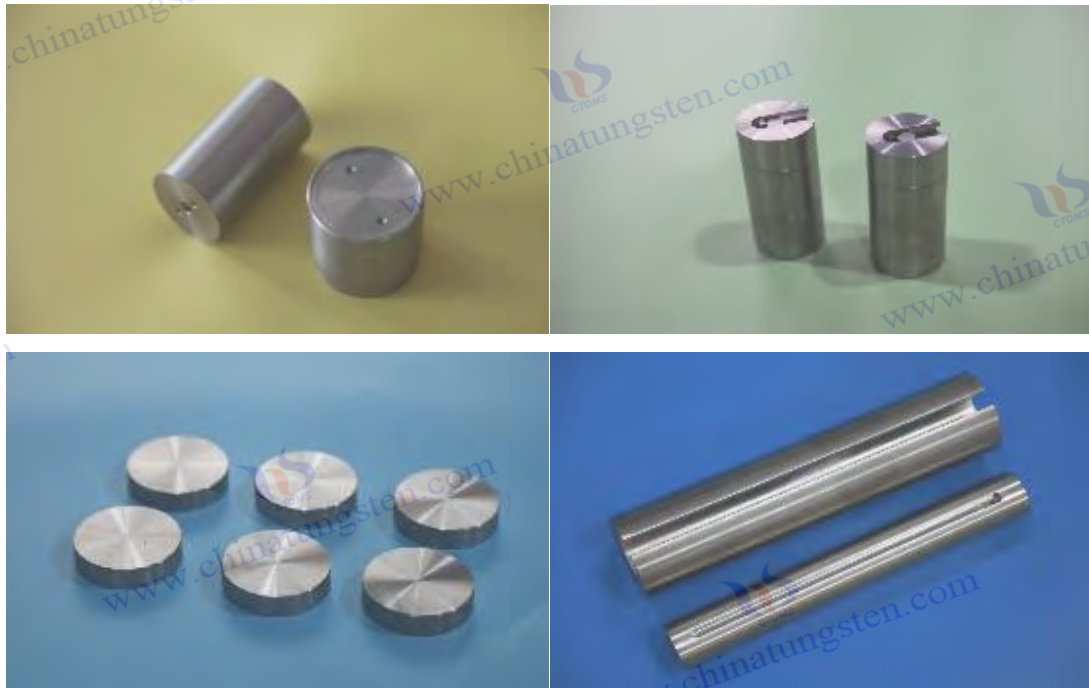
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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)



## apéndice

### Apéndice A: Norma china para láminas de aleación de tungsteno

chinas [para láminas de aleación de tungsteno](#) son responsabilidad principal del Comité Técnico Nacional de Normalización de Metales No Ferrosos (TC243) y sus subcomités, y cubren aspectos como la composición química, las propiedades físicas, la tecnología de procesamiento y el control de calidad de las aleaciones de tungsteno. Estas normas se basan en las políticas industriales nacionales y la planificación de los recursos minerales, lo que garantiza la fiabilidad y la consistencia de las láminas de aleación de tungsteno en aplicaciones industriales. Las normas enfatizan el uso de polvo de tungsteno de alta pureza, la estandarización de los procesos de sinterización en fase líquida y las limitaciones estrictas de impurezas como oxígeno, carbono y fósforo para evitar defectos estructurales y desviaciones de rendimiento. El sistema estándar incluye normas nacionales (serie GB/T), normas industriales (serie YS/T) y normas empresariales, aplicables a sistemas comunes como tungsteno-níquel-hierro, tungsteno-níquel- cobre y tungsteno- cobre.

Las normas suelen especificar rangos de composición, distribuciones de densidad, índices de dureza y tolerancias dimensionales. Después de la sinterización, la palanquilla debe someterse a un procesamiento termomecánico para verificar la uniformidad. Los métodos de análisis químico están estandarizados, como el método gravimétrico de cinquerina para determinar el contenido de tungsteno, lo que garantiza la precisión. Las normas también abordan los requisitos ambientales y de seguridad, haciendo hincapié en la legalidad y la sostenibilidad de la adquisición de materia prima y previniendo el uso de productos minerales ilegales. En los últimos años, con el fortalecimiento de los requisitos de entrada en la industria del tungsteno, las normas han incorporado elementos de control de exportación, proporcionando orientación de cumplimiento para el procesamiento y el comercio de productos específicos de aleación de tungsteno. La implementación de las normas de láminas de aleación de tungsteno promueve la estandarización en todo el proceso, desde la pulvimetalurgia hasta las láminas terminadas, lo que respalda la expansión de aplicaciones en la fabricación de alta gama.

#### Normas nacionales (serie GB/T)

Las normas nacionales (serie GB/T) son las especificaciones fundamentales para las láminas de aleación de tungsteno en China, emitidas por la Administración Estatal de Regulación del Mercado y la Administración de Normalización de China. Abarcan los requisitos generales, los métodos de prueba y los indicadores de rendimiento de las aleaciones de tungsteno. Estas normas se aplican al análisis de la composición química, el mecanizado y la aceptación de la calidad de las láminas de aleación de tungsteno, garantizando un equilibrio en densidad, dureza y estabilidad térmica. Las normas nacionales para láminas de aleación de tungsteno enfatizan la estandarización de los procesos de pulvimetalurgia, desde la pureza del polvo de tungsteno hasta el control de la ventana de temperatura de sinterización. Químicamente, especifican la proporción de contenido de tungsteno, la proporción de la fase aglutinante y los umbrales de impurezas para lograr una distribución uniforme de la microestructura bifásica.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El proceso de establecimiento de normas implicó la colaboración de múltiples partes, incluyendo institutos de investigación de metales no ferrosos y empresas manufactureras, haciendo referencia a normas internacionales pero incorporando las características de los recursos de China. La norma GB/T para láminas de aleación de tungsteno incluye especificaciones generales para barras, placas y placas de aleación de tungsteno, especificando el acabado superficial, las tolerancias de espesor y las condiciones de recocido. Los métodos de prueba química, como la determinación del contenido de trióxido de tungsteno, utilizan el método gravimétrico de tungstato de amonio para garantizar la precisión. La norma también cubre los requisitos de tratamiento térmico, optimizando la temperatura de recristalización en el proceso de recocido para evitar que el engrosamiento del grano afecte las propiedades mecánicas. Las normas orientadas a la exportación incorporan cláusulas regulatorias, especificando los requisitos de informe para las especificaciones de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro o tungsteno-níquel-cobre para apoyar el cumplimiento del comercio internacional.

A nivel de aplicación, la norma GB/T rige el uso de láminas de aleación de tungsteno en instrumentos de precisión y gestión térmica, abarcando una amplia gama de tamaños, desde láminas micrométricas hasta placas centimétricas. El ciclo de revisión de la norma tiene en cuenta los avances tecnológicos, como la inclusión de aleaciones nanorreforzadas. Durante la implementación, las empresas deben someterse a la verificación de laboratorios certificados, con muestreo de lotes para pruebas de composición y densidad. La sostenibilidad ambiental se incorpora a la norma, fomentando el reciclaje del polvo de tungsteno para reducir el consumo de recursos.

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

Las normas industriales (serie YS/T), supervisadas por el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información, están formuladas para el análisis químico y el procesamiento de láminas de aleaciones de tungsteno, proporcionando especificaciones técnicas más detalladas. Estas normas son aplicables a la producción de aleaciones de tungsteno-cobre y láminas de aleaciones de alta densidad a base de tungsteno, garantizando la determinación precisa de la composición química y un rendimiento constante. Las normas YS/T se centran en métodos para determinar el contenido de tungsteno, como el método gravimétrico de cinquercetina, que logra un análisis de alta precisión mediante la separación por disolución y precipitación, adecuado para verificar el porcentaje de tungsteno en aleaciones de tungsteno-cobre. Las normas también especifican la preparación de muestras, la calibración de instrumentos y el control de errores, con énfasis en la sustracción de interferencias de la matriz.

La norma de la industria de láminas de aleación de tungsteno incluye detalles del proceso pulvimetalúrgico, desde la mezcla de polvos hasta los perfiles de temperatura para la sinterización en fase líquida, y la optimización de la cantidad de fase líquida para promover la reorganización de partículas. Las normas de la serie YS/T abarcan las especificaciones de las láminas para sistemas de tungsteno-níquel-hierro y tungsteno-níquel-cobre, especificando la distribución de la dureza y los requisitos de rugosidad superficial, y facilitando la adaptabilidad del procesamiento para aplicaciones de moldeo y blindaje. Las normas se desarrollan con referencia a la planificación nacional e incorporan las

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

condiciones de acceso a los recursos para garantizar la legalidad de las materias primas y el cumplimiento ambiental.

En aplicaciones, la norma YS/T guía la estandarización de los métodos de control de calidad, tolerancia dimensional y pruebas de conductividad térmica para láminas de aleaciones de tungsteno en los sectores de la electrónica y la medicina. El proceso de revisión incorporó las opiniones de los usuarios e incluyó cláusulas para aleaciones emergentes, como los compuestos de tungsteno y molibdeno. Su implementación exige que las empresas establezcan laboratorios internos y calibren periódicamente los equipos de prueba. En cuanto a la gestión ambiental, la norma fomenta las tecnologías de sinterización de bajo consumo energético para reducir las emisiones de carbono.

### **Normas empresariales y locales**

Las normas empresariales y locales son regulaciones complementarias para la producción de láminas de aleación de tungsteno en China. Desarrolladas por empresas de metales no ferrosos o asociaciones industriales locales, ofrecen una guía flexible para sistemas de aleación específicos o escenarios de aplicación. Estas normas se basan en el marco nacional, pero incorporan la experiencia de los procesos empresariales para garantizar su adaptabilidad a la producción en masa. Las normas empresariales, como las especificaciones internas de Zhuzhou Cemented Carbide Group, estipulan los pasos de laminación y los regímenes de recocido para las láminas de aleación de tungsteno, y optimizan químicamente la distribución de la fase aglutinante para mejorar la tenacidad. Las normas locales son comunes en zonas productoras de tungsteno, como las provincias de Hunan y Jiangxi, y, junto con la planificación de los recursos minerales, priorizan la trazabilidad de las materias primas y el control de impurezas.

Estas normas abarcan los métodos de análisis químico para aleaciones de tungsteno-cobre, incluyendo la determinación de oligoelementos, y son aplicables a la verificación de la conformidad de los productos exportados. Las normas empresariales priorizan los sistemas de gestión de calidad, la integración de la certificación ISO 9001 en los procesos de producción y el seguimiento de lotes para garantizar la consistencia. Las normas locales promueven la colaboración regional, como las especificaciones estandarizadas para aleaciones de alta densidad basadas en tungsteno, lo que facilita la optimización de la cadena de suministro. A nivel de aplicación, las normas empresariales rigen la personalización de las láminas de aleación de tungsteno en instrumentos de precisión, mientras que las normas locales promueven la producción respetuosa con el medio ambiente. Las revisiones responden dinámicamente al mercado e incorporan cláusulas para aleaciones de alta entropía. Durante la implementación, se realizan auditorías internas para verificar el cumplimiento de las normas. La sostenibilidad ambiental prioriza el reciclaje y la reducción de las emisiones de polvo residual.

### **Apéndice B Normas internacionales para láminas de aleación de tungsteno**

Las normas internacionales para láminas de aleaciones de tungsteno son desarrolladas principalmente por organizaciones como ASTM International y SAE International. Estas normas proporcionan un marco regulatorio global unificado que abarca la composición química, las propiedades mecánicas y los

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

métodos de ensayo de láminas de aleaciones pesadas de tungsteno, garantizando así la interoperabilidad de materiales en los sectores aeroespacial, médico y electrónico. Las normas internacionales enfatizan la clasificación de aleaciones de tungsteno de alta densidad, como el sistema de clasificación ASTM B777, que define especificaciones basadas en el contenido de tungsteno y el tipo de fase aglutinante. El proceso de desarrollo de la norma implica la colaboración entre expertos de varios países y hace referencia a los requisitos generales para los procesos de pulvimetalurgia.

La sección de análisis químico de la norma internacional estandariza la determinación del contenido de tungsteno y los límites de impurezas, lo que facilita la certificación para el comercio internacional. Los indicadores de rendimiento, como la distribución de la densidad, la dureza y la conductividad térmica, son aplicables al laminado de chapa y a la verificación del tratamiento térmico. La norma también incorpora sistemas de gestión de calidad, como la ISO 9001, para garantizar la consistencia de la producción. Las normas de control de las exportaciones, como el Acuerdo de Wassenaar, influyen en la circulación internacional de las aleaciones de tungsteno, priorizando la presentación de informes de cumplimiento.

En las aplicaciones, las normas internacionales rigen el uso de láminas de aleación de tungsteno en blindajes contra la radiación y disipadores de calor, con tolerancias dimensionales y requisitos de rugosidad superficial que favorecen el mecanizado de precisión. Los ciclos de revisión consideran los avances tecnológicos e incorporan cláusulas sobre aleaciones compuestas. Su implementación requiere la certificación de un laboratorio independiente y el cumplimiento de las pruebas de lote. La sostenibilidad ambiental fomenta las prácticas de reciclaje.

### Norma internacional ASTM

Las normas internacionales ASTM son las especificaciones fundamentales para la exportación de láminas de aleación de tungsteno desde China. Desarrolladas por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, abarcan las especificaciones estándar para láminas de aleación pesada de tungsteno, como la clasificación ASTM B777 de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro y tungsteno-níquel-cobre, que define los grados de densidad y los requisitos mecánicos. Estas normas son aplicables a la producción y prueba de láminas, especificando químicamente los rangos de contenido de tungsteno, las proporciones de la fase aglutinante y los umbrales de impurezas para garantizar el equilibrio de la microestructura bifásica.

La norma ASTM B777 especifica detalladamente la composición química y las propiedades físicas de las láminas de aleación de tungsteno. Tras la sinterización, las láminas deben laminarse en caliente para verificar su uniformidad. La norma incluye métodos de prueba, como el método gravimétrico Cincinnatiel para determinar el contenido de tungsteno, y facilita el control de precisión. La norma ASTM B760, que originalmente especificaba láminas y hojas de tungsteno puro, se extiende a las especificaciones del proceso de laminado para láminas de aleación.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



En aplicaciones, las normas ASTM guían el uso de láminas de aleación de tungsteno en blindaje aeroespacial y médico, con tolerancias dimensionales y especificaciones de dureza que facilitan la adaptabilidad del procesamiento. El proceso de revisión incorporó la retroalimentación global e incluyó disposiciones sobre tolerancia a la radiación. Durante la implementación, laboratorios certificados por la empresa validan y el muestreo de lotes confirma el cumplimiento. La gestión ambiental prioriza la producción sostenible.

### **Norma internacional SAE**

internacionales SAE, desarrolladas por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE), abordan la aplicación de láminas de aleación de tungsteno en el sector aeroespacial. Normas como la AMS 7725 especifican los requisitos de rendimiento para láminas de aleación de tungsteno pesadas. Estas normas enfatizan la alta resistencia y estabilidad térmica, lo que las hace adecuadas para componentes de alta temperatura. Las normas SAE especifican la composición química y la microestructura de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, limitando químicamente el ferromagnetismo para evitar interferencias electromagnéticas.

La norma AMS 7725 especifica detalladamente la distribución de la densidad y el estado de recocido de las láminas de aleación de tungsteno. Tras la sinterización, las láminas deben someterse a forjado y laminado para verificar su tenacidad. La norma incluye métodos de ensayo, como la determinación de la resistencia a la tracción y la tenacidad a la fractura, y apoya el equilibrio mecánico.

En las aplicaciones, las normas SAE guían el uso de láminas de aleación de tungsteno en el hardware de vuelo, con indicadores de tolerancia a la vibración y fatiga que respaldan el diseño. Los ciclos de revisión consideran los avances aeroespaciales e incorporan disposiciones sobre estructuras compuestas. La implementación requiere la certificación AS9100 y el cumplimiento de las pruebas de lotes. La sostenibilidad ambiental fomenta los procesos de bajo consumo energético.

### **Norma internacional ISO**

Las normas internacionales ISO proporcionan un marco global unificado para las láminas de aleación de tungsteno. Desarrolladas por la Organización Internacional de Normalización (OIM), normas como la integración del sistema de gestión de calidad ISO 9001 se han extendido a las especificaciones generales para las placas de aleación pesada de tungsteno. Estas normas se aplican a la producción de láminas mediante pulvimetalurgia, especificando químicamente la pureza y el control de impurezas para garantizar el cumplimiento de las regulaciones comerciales internacionales.

Las normas ISO especifican el análisis químico y las pruebas físicas de las placas de aleación de tungsteno, y el proceso de sinterización debe cumplir con los requisitos ambientales. Las normas incluyen directrices de certificación global y facilitan la verificación de las exportaciones.

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

En aplicaciones, las normas ISO guían el uso de láminas de aleación de tungsteno en los sectores de la electrónica y la medicina, cumpliendo requisitos funcionales como la precisión dimensional y la resistencia a la corrosión. El proceso de revisión implica la colaboración multinacional e incorpora disposiciones de sostenibilidad. Durante la implementación, las empresas se someten a auditorías para garantizar la trazabilidad de los lotes y el cumplimiento normativo. La gestión ambiental prioriza el reciclaje de recursos. En resumen, las normas internacionales ISO incorporan el aseguramiento global de la calidad de las láminas de aleación de tungsteno, estandarizan la producción mediante sistemas de gestión y promueven la profundización de la cooperación internacional.

### **Apéndice C: Normas para láminas de aleación de tungsteno en Europa, América, Japón, Corea del Sur y otros países**

Los sistemas de normalización de láminas en países como EE. UU., Europa, Japón y Corea del Sur son diversos. EE. UU. utiliza principalmente las normas ASTM, Europa las normas EN, Japón las normas JIS y Corea del Sur las normas KS. Estas normas abarcan la composición, las propiedades y el procesamiento de las láminas de aleación pesada de tungsteno, priorizando las necesidades de la industria regional. Las normas europeas y estadounidenses se centran en aplicaciones aeroespaciales y médicas, las japonesas en productos químicos finos y las surcoreanas en el apoyo a las exportaciones de productos electrónicos. El desarrollo de normas implica la participación de asociaciones industriales, que toman como referencia las normas internacionales y, al mismo tiempo, incorporan recursos locales.

La química estándar de estos países especifica límites para el contenido de tungsteno y las impurezas, y los indicadores de rendimiento incluyen la densidad y la conductividad térmica. Las aplicaciones respaldan el uso de láminas de aleación de tungsteno en blindaje y disipadores de calor. La tecnología de respuesta dinámica se está revisando para incorporar innovaciones en aleaciones. Su implementación requiere laboratorios certificados y el cumplimiento de la verificación de lotes. La sostenibilidad ambiental prioriza el reciclaje.

#### **Normas americanas (ASTM, series AMS)**

Estándares globales para láminas de aleación de tungsteno, desarrollados por ASTM International y SAE. Por ejemplo, la norma ASTM B 777 clasifica las láminas de aleación pesada de tungsteno, definiendo los grados de densidad y las especificaciones mecánicas. Estas normas se aplican a la pulvimetalurgia y al laminado de láminas, especificando químicamente la proporción de la fase aglutinante de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro para garantizar variantes no magnéticas.

La norma ASTM B777 especifica la composición química y los métodos de prueba en detalle, y exige la verificación del tratamiento térmico de las láminas sinterizadas. La norma AMS 7725, para láminas de aleación de tungsteno aeroespaciales, enfatiza la resistencia a la fatiga. Las aplicaciones respaldan el uso de láminas de aleación de tungsteno en los sectores aeroespacial y médico. El proceso de revisión se sometió a una revisión por expertos e incorporó disposiciones sobre radiación. Se implementó la certificación AS9100.

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

### Normas europeas (Serie EN)

Las normas europeas (serie EN) son desarrolladas por el Comité Europeo de Normalización. Por ejemplo, la norma EN 2685 establece requisitos generales para las láminas de aleación de tungsteno. Estas normas se aplican a la composición y las propiedades de las aleaciones pesadas de tungsteno, limitando químicamente las impurezas para garantizar el cumplimiento de las normas ambientales. Las normas EN especifican los procesos de sinterización y las tolerancias dimensionales, lo que facilita el comercio europeo de materiales en lámina. En cuanto a las aplicaciones, guían el uso de láminas de aleación de tungsteno en aplicaciones nucleares y electrónicas. Las revisiones implican la colaboración multinacional. El marcado CE es obligatorio.

### Estándares japoneses (serie JIS)

Las normas japonesas (serie JIS) son formuladas por el Comité Japonés de Normas Industriales. Por ejemplo, la norma JIS H 7804 especifica la composición de las láminas de aleación de tungsteno. Estas normas se aplican a aplicaciones electrónicas, centrándose en la composición química fina. Las normas JIS enfatizan la pureza y la precisión del procesamiento, apoyando a la industria japonesa de láminas de aleación de tungsteno. En aplicaciones, guían el uso de láminas de aleación de tungsteno en semiconductores. También revisan las directrices técnicas y garantizan el cumplimiento de la certificación JIS.

### Estándar coreano (serie KS)

Las normas coreanas (serie KS) son formuladas por la Agencia Coreana de Normas Industriales. Por ejemplo, la KS D 3615 especifica los requisitos para las láminas de aleación de tungsteno. Estas normas respaldan las exportaciones electrónicas y definen químicamente la conductividad térmica. Las normas KS especifican los métodos de prueba para la fabricación de láminas en Corea. En cuanto a las aplicaciones, guían el uso de nuevas fuentes de energía. También revisan las colaboraciones con la industria e implementan la marca KS.



CTIA GROUP LTD Láminas 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 Tabla de terminología para láminas de aleación de tungsteno

Terminología china	Breve explicación
Lámina de aleación de tungsteno	Materiales en forma de placas delgadas fabricados con tungsteno como componente principal y preparados y laminados mediante pulvimetalurgia.
Aleación de tungsteno de alta gravedad específica	de alta densidad basadas en tungsteno , normalmente con un contenido de tungsteno superior al 90%, se utilizan para contrapesos o blindaje.
Sinterización en fase líquida	El proceso de sinterización implica la aparición de una fase líquida, que promueve la reorganización y densificación de las partículas.
fase aglutinante	Las partículas de tungsteno en la aleación proporcionan plasticidad y tenacidad.
Disolución-reprecipitación	El mecanismo por el cual los átomos de tungsteno se disuelven y vuelven a precipitar en la fase aglutinante durante la sinterización en fase líquida promueve la esferoidización de las partículas.
Prensado isostático en frío	Un método para prensar y moldear uniformemente piezas en bruto de polvo utilizando un medio líquido.
Prensado isostático en caliente	Tecnología de postprocesamiento que elimina la porosidad y aumenta la densidad bajo alta temperatura y alta presión.
colimador multiláminas	Un dispositivo de conformación de haz compuesto por hojas de aleación de tungsteno en un equipo de radioterapia.
disipador de calor	Los sustratos térmicamente conductores utilizados para la disipación de calor de dispositivos electrónicos suelen estar hechos de aleación de tungsteno y cobre.
pseudoaleaciones	sustancias no sólidas , como las aleaciones de tungsteno y cobre, se preparan mediante infiltración de material fundido.
recocido de recristalización	El recocido a alta temperatura induce la recristalización, eliminando la tensión del procesamiento y restaurando 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 la deformación rodante afecta la anisotropía.
película de pasivación	Una capa protectora de óxido, formada espontánea o artificialmente sobre la superficie, mejora la resistencia a la corrosión.
Tamaño de grano de Fisher	Tamaño promedio de partícula de polvo determinado por el método de permeación de aire.
Arquímedes	El método para determinar la densidad de materiales por desplazamiento de agua.
Dureza Vickers	El índice de dureza medido por el penetrador de diamante es aplicable a las aleaciones de tungsteno.
Atenuación de rayos X	La capacidad de un material para absorber y dispersar rayos X o rayos gamma.
coeficiente de expansión térmica	La tasa de expansión dimensional de un material bajo cambios de temperatura es importante para su adaptación al sustrato.
Biocompatibilidad	El material es seguro en contacto con tejidos biológicos, no es tóxico ni alergénico.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Referencias

### Referencias chinas

- [1] Wang Xiaoming, Li Wei. Proceso de preparación y estudio del rendimiento de materiales de aleación de tungsteno [J]. Materiales e Ingeniería de Metales No Ferrosos, 2020, 41(5): 45-52.
- [2] Zhang Hua, Liu Jun. Optimización del proceso de pulvimetalurgia para láminas de aleación de tungsteno de alta densidad [J]. Tecnología de pulvimetalurgia, 2019, 37(4): 278-284.
- [3] Chen Li, Zhao Ming. Análisis de la microestructura y las propiedades mecánicas de láminas de aleación de tungsteno-níquel-hierro [J]. Materials Reports, 2021, 35(12): 12015-12020.
- [4] Sun Wei, Yang Fan. Aplicación de láminas compuestas de tungsteno y cobre en encapsulados electrónicos [J]. Materiales y Tecnología Electrónica, 2022, 46(3): 89-95.
- [5] Li Na, Wang Qiang. Proceso de laminación y tecnología de tratamiento superficial de láminas delgadas de aleación de tungsteno [J]. Materiales e Ingeniería de Metales Raros, 2018, 47(8): 1567-1573.
- [6] Xu Gang, Huang Wei. Avances en la aplicación de aleaciones de tungsteno en el blindaje radiológico [J]. Tecnología Nuclear, 2023, 46(2): 201-208.
- [7] Liu Yang, Zhang Lei. Influencia del proceso de tratamiento térmico en el rendimiento de láminas de aleación de tungsteno [J]. Tecnología de Tratamiento Térmico, 2020, 49(10): 112-118.
- [8] Zhao Peng, Chen Ming. Avances en la investigación sobre la tecnología de preparación de polvo de aleación de tungsteno [J]. Industria de la metalurgia de polvos, 2021, 31(6): 67-74.

### Referencias en inglés

- [1] Smith J, Johnson A. Preparación y propiedades de aleaciones pesadas de tungsteno[J]. Revista de Ciencia de Materiales, 2019, 54(12): 8900-8915.
- [2] German R M. Sinterización en fase líquida de aleaciones pesadas de tungsteno[J]. Revista Internacional de Metalurgia de Polvos, 2020, 56(4): 45-58.
- [3] Lee KH, et al. Microestructura y propiedades mecánicas de aleaciones W-Ni-Fe[J]. Ciencia e ingeniería de materiales: A, 2021, 802: 140-152.
- [4] Upadhyaya G S. Compuestos de tungsteno y cobre para aplicaciones eléctricas[J]. Revista de tecnología de procesamiento de materiales, 2018, 258: 123-135.
- [5] Bose A, et al. Laminado de láminas de aleación de tungsteno: proceso y propiedades[J]. Metalurgia de polvos, 2022, 65(3): 210-225.
- [6] Kim Y, et al. Rendimiento de protección contra la radiación de las aleaciones de tungsteno[J]. Ingeniería nuclear y tecnología, 2023, 55(5): 1789-1796.
- [7] Das J, et al. Efectos del tratamiento térmico en aleaciones pesadas de tungsteno[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(8): 3678-3690.
- [8] Luo SD, et al. Técnicas de preparación de polvos para aleaciones de tungsteno[J]. International Materials Reviews, 2021, 66(7): 489-512.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT