

Qué es la aleación de tungsteno y plata

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

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

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

Tabla de contenido

Capítulo 1: Conocimientos básicos de la aleación de plata y tungsteno

- 1.1 Concepto de aleación de plata y tungsteno
 - 1.1.1 Definición de aleación de plata y tungsteno
 - 1.1.2 Diferencias con la aleación de cobre y tungsteno
 - 1.1.3 Diferencias con la aleación de tungsteno-molibdeno
- 1.2 Historia del desarrollo de la aleación de plata y tungsteno
 - 1.2.1 Etapa de exploración temprana
 - 1.2.2 Avances tecnológicos y el inicio de las aplicaciones industriales
 - 1.2.3 Innovación tecnológica moderna
- 1.3 Importancia y significado de la investigación industrial
 - 1.3.1 Promoción del desarrollo de la ciencia de los materiales
 - 1.3.2 Valor de la aplicación en diversos campos

Capítulo 2: Composición y características de la aleación de plata y tungsteno

- 2.1 Características de la plata y el tungsteno
 - 2.1.1 Propiedades físicas y químicas de la plata
 - 2.1.1 Propiedades físicas y químicas del tungsteno
 - 2.1.3 Composición del tungsteno y la plata
- 2.2 Efecto de la relación de composición de la aleación de plata y tungsteno
 - 2.2.1 Efecto de la relación plata-tungsteno en la resistencia a la flexión de la aleación
 - 2.2.2 Efecto de la relación plata-tungsteno en la tenacidad de la aleación
 - 2.2.3 Efecto de la relación plata-tungsteno en la conductividad de las aleaciones
 - 2.2.4 Efecto de la relación plata-tungsteno en la conductividad térmica de la aleación
 - 2.2.5 Efecto de la relación plata-tungsteno en la densidad de la aleación
 - 2.2.6 Efecto de la relación plata-tungsteno en la dureza de la aleación
 - 2.2.7 Efecto de la relación plata-tungsteno en la resistencia a altas temperaturas de la aleación
 - 2.2.8 Efecto de la relación plata-tungsteno en la resistencia a la erosión por arco de las aleaciones
- 2.3 Análisis del rendimiento de la aleación de plata y tungsteno
 - 2.3.1 Mecanismo de formación y ventajas de la alta dureza de la aleación de plata y tungsteno
 - 2.3.1.1 Mecanismo microestructural de formación de alta dureza
 - 2.3.1.2 Ventajas de la alta dureza en aplicaciones resistentes al desgaste
 - 2.3.1.3 Comparación de dureza con otras aleaciones y ventajas
 - 2.3.2 Principio y rendimiento de la resistencia a la erosión por arco de la aleación de plata y tungsteno
 - 2.3.2.1 Mecanismo de erosión por arco
 - 2.3.2.2 El principio intrínseco de la aleación de plata y tungsteno que resiste la erosión por arco
 - 2.3.2.3 Diferencias en el rendimiento de la resistencia a la erosión por arco en diferentes entornos de uso
 - 2.3.2.4 Formas de mejorar la resistencia a la erosión por arco
 - 2.3.3 Capacidades antiadherentes y antisoldantes de la aleación de plata y tungsteno
 - 2.3.3.1 Causas de adhesión y soldadura
 - 2.3.3.2 Rendimiento antiadherente de la aleación de plata y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2.3.3.3 Análisis de los factores que afectan las capacidades antiadherente y antisoldante
- 2.3.4 Principio y aplicación de la excelente conductividad de la aleación de plata y tungsteno
 - 2.3.4.1 Naturaleza física de la conductividad y mecanismo conductor de la aleación de plata y tungsteno
 - 2.3.4.2 Cambios en la conductividad en diferentes proporciones de componentes
 - 2.3.4.3 Ventajas de las aplicaciones conductoras en equipos eléctricos
- 2.3.5 Características y valor de la buena conductividad térmica de la aleación de plata y tungsteno
 - 2.3.5.1 Principios básicos de la conductividad térmica y mecanismo de conductividad térmica de la aleación de plata y tungsteno
 - 2.3.5.2 Relación entre la conductividad térmica y el efecto de disipación del calor
 - 2.3.5.3 Valor de aplicación de la conductividad térmica en entornos de trabajo de alta temperatura
- 2.3.6 Rendimiento y mecanismo de resistencia a la corrosión de la aleación de plata y tungsteno
 - 2.3.6.1 Efectos de diferentes entornos de corrosión en la aleación de plata y tungsteno
 - 2.3.6.2 Mecanismo intrínseco de resistencia a la corrosión de la aleación de plata y tungsteno
 - 2.3.6.3 Medios tecnológicos para mejorar la resistencia a la corrosión
- 2.4 CTIA GROUP LTD Ficha de datos de seguridad de la aleación de tungsteno y plata

Capítulo 3: Observación de las características de la microestructura y correlación del rendimiento de la aleación de plata y tungsteno

- 3.1 Observación de las características de la microestructura de la aleación de plata y tungsteno
 - 3.1.1 Morfología del grano y características de tamaño
 - 3.1.2 Distribución de fases y características de la interfaz
 - 3.1.3 Manifestaciones microscópicas de porosidad y defectos
 - 3.1.4 Diferencias de microestructura bajo distintos procesos de preparación
- 3.2 Relación intrínseca entre la estructura de la aleación de plata y tungsteno y las propiedades macroscópicas
 - 3.2.1 Mecanismo del efecto de la estructura del grano sobre la resistencia y la tenacidad
 - 3.2.2 Correlación entre la distribución de fases y la conductividad eléctrica y térmica
 - 3.2.3 Efecto de la porosidad y los defectos en la dureza y la resistencia a la corrosión
- 3.3 Evolución de la microestructura de la aleación de plata y tungsteno
 - 3.3.1 Evolución de la microestructura causada por cambios en las proporciones de composición
 - 3.3.2 Transformación microestructural durante el tratamiento térmico
 - 3.3.3 Efecto del entorno del servicio en la microestructura y la retroalimentación del rendimiento
- 3.4 Métodos para controlar la microestructura de la aleación de plata y tungsteno
 - 3.4.1 Método de control de la microestructura basado en el proceso de preparación
 - 3.4.2 Optimización de la microestructura mediante la adición de elementos de aleación
 - 3.4.3 Relación entre la regulación de la microestructura y la personalización del rendimiento

Capítulo 4: Proceso de preparación de la aleación de plata y tungsteno

- 4.1 Método de pulvimetalurgia para la producción de aleación de plata y tungsteno
 - 4.1.1 Proceso de preparación del polvo y puntos clave
 - 4.1.2 Principio y funcionamiento del proceso de prensado
 - 4.1.3 Control e influencia del proceso de sinterización

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2 Producción de aleación de plata y tungsteno mediante el método de infiltración al vacío

4.2.1 Principio de infiltración y requisitos del equipo

4.2.2 Pasos del proceso y optimización de parámetros

4.2.3 Ventajas y limitaciones del proceso

4.3 Comparación de procesos y base de selección

4.3.1 Análisis de costos de diferentes procesos

4.3.2 Diferencias de rendimiento y selección de procesos

4.3.3 Eficiencia de producción y adaptación de procesos

Capítulo 5: Pruebas de rendimiento y caracterización de la aleación de plata y tungsteno

5.1 Prueba de propiedades físicas de la aleación de plata y tungsteno

5.1.1 Método de prueba de densidad

5.1.2 Normas y operaciones de prueba de dureza

5.1.3 Métodos de prueba de conductividad eléctrica y conductividad térmica

5.2 Evaluación de las propiedades químicas de la aleación de plata y tungsteno

5.2.1 Entorno y métodos de prueba de resistencia a la corrosión

5.2.2 Métodos de prueba del rendimiento antioxidante

5.3 Tecnología de caracterización de la microestructura de aleaciones de plata y tungsteno

5.3.1 Método de observación con microscopio metalográfico

5.3.2 Aplicaciones del análisis de microscopía electrónica de barrido

5.3.3 Análisis estructural por difracción de rayos X

Capítulo 6: Campos de aplicación de la aleación de plata y tungsteno

6.1 Aplicación de la aleación de plata y tungsteno en el campo eléctrico

6.1.1 Ventajas de aplicación en interruptores de potencia de baja tensión

6.1.1.1 Requisitos de rendimiento para materiales de interruptores de potencia de baja tensión

6.1.1.2 Aplicación de la aleación de plata y tungsteno en interruptores de potencia de bajo voltaje

6.1.1.3 Ventajas del uso de materiales de PCB en interruptores de potencia de bajo voltaje en comparación con otros materiales

6.1.2 Demanda de aleaciones eléctricas para interruptores de alto voltaje

6.1.2.1 Entorno de trabajo del interruptor de alto voltaje y requisitos especiales para aleaciones eléctricas

6.1.2.2 Rendimiento de la aleación de plata y tungsteno para cumplir con los requisitos de los interruptores de alto voltaje

6.1.3 Aplicación de relés e interruptores automáticos de aire

6.1.3.1 Principio de funcionamiento del relé y requisitos de los materiales de contacto

6.1.3.2 Efecto de la aplicación de la aleación de plata y tungsteno en relés

6.1.3.3 Requisitos de rendimiento de los interruptores automáticos de aire y compatibilidad de la aleación de plata y tungsteno

6.1.4 Aplicación en seccionadores y seccionadores de puesta a tierra

6.1.4.1 Requisitos de función y materiales para interruptores de aislamiento y seccionadores de puesta a tierra

6.1.4.2 Ventajas de la aleación de plata y tungsteno en interruptores de aislamiento y seccionadores de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

puesta a tierra

6.2 Aplicación de la aleación de plata y tungsteno en la electrónica

6.2.1 Requisitos de rendimiento y aplicaciones de los electrodos EDM

6.2.1.1 Requisitos del índice de rendimiento de los materiales de los electrodos para el proceso de electromecanizado

6.2.1.2 Ventajas de rendimiento de la aleación de plata y tungsteno como electrodo de electromecanizado

6.2.1.3 Selección de electrodos de aleación de plata y tungsteno en diferentes escenarios de mecanizado eléctrico

6.2.2 Papel de los materiales en la microelectrónica

6.2.2.1 Requisitos de precisión para materiales en el campo de la microelectrónica

6.2.2.2 Aplicación de la aleación de plata y tungsteno en el encapsulado microelectrónico

6.2.2.3 El papel de la aleación de plata y tungsteno en los componentes de conexión microelectrónica

6.2.3 Exploración de aplicaciones en sensores

6.2.3.1 Entorno de trabajo del sensor y requisitos de rendimiento del material

6.2.3.2 Posibles escenarios de aplicación de la aleación de plata y tungsteno en sensores

6.3 Aplicación de la aleación de tungsteno y plata en la industria aeroespacial

6.3.1 Aplicación del revestimiento de garganta de boquilla de cohete sólido

6.3.1.1 Entorno de trabajo y desafíos materiales del revestimiento de la garganta de la boquilla de un cohete sólido

6.3.1.2 Rendimiento de la aleación de tungsteno y plata como revestimiento de garganta de boquilla

6.3.1.3 Preparación y efecto de aplicación del revestimiento de garganta de boquilla de aleación de plata y tungsteno

6.3.2 Aplicaciones potenciales de los componentes de motores aeroespaciales

6.3.2.1 Requisitos para los materiales en el entorno de trabajo de alta temperatura y alta presión de los motores de aeronaves

6.3.2.2 Potencial de aplicación de la aleación de plata y tungsteno en piezas específicas de motores de aeronaves

6.3.3 Aplicación en sistemas eléctricos de naves espaciales

6.3.3.1 Requisitos de confiabilidad para los sistemas eléctricos de las naves espaciales

6.3.3.2 Aplicación de la aleación de plata y tungsteno en contactores de naves espaciales y otros componentes

6.4 Aplicación de la aleación de plata y tungsteno en otros campos

6.4.1 Escenarios de aplicación en la industria metalúrgica

6.4.1.1 Condiciones de trabajo y requisitos de materiales de los equipos metalúrgicos

6.4.1.2 Aplicación de la aleación de plata y tungsteno en electrodos de hornos metalúrgicos

6.4.1.3 Uso de aleación de plata y tungsteno en instrumentos de pruebas metalúrgicas

6.4.2 Casos de uso en equipamiento deportivo

6.4.2.1 Requisitos para el rendimiento de los materiales de los equipos deportivos de alta gama

6.4.2.2 Aplicación de aleación de plata y tungsteno en cabezas de golf, aparejos de pesca y otros equipos

6.4.3 Exploración y aplicación en el campo de los dispositivos médicos

6.4.3.1 Requisitos de biocompatibilidad de materiales y rendimiento de los dispositivos médicos

6.4.3.2 Aplicación de la aleación de plata y tungsteno en equipos de imágenes médicas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4.3.3 Posibles aplicaciones de la aleación de plata y tungsteno en instrumentos quirúrgicos de precisión

6.4.4 Perspectivas de aplicación en el campo de la energía nuclear

6.4.4.1 Requisitos para la resistencia a la radiación de los materiales y otras propiedades en los equipos de energía nuclear

6.4.4.2 Análisis de la posibilidad de aplicación de la aleación de plata-tungsteno en el campo de la energía nuclear

Capítulo 7: Dirección de desarrollo futuro de la aleación de plata y tungsteno

7.1 Exploración de nuevas tecnologías de preparación de aleación de plata y tungsteno

7.1.1 Aplicaciones potenciales de la tecnología de fabricación aditiva

7.1.2 Perspectivas de otras tecnologías de preparación de vanguardia

7.2 Tendencias de investigación en la optimización del rendimiento de las aleaciones de plata y tungsteno

7.2.1 Direcciones de investigación para mejorar el desempeño integral

7.2.2 Mejoras de rendimiento para aplicaciones específicas

Apéndice

Apéndice A: Norma nacional china para la aleación de plata y tungsteno

Apéndice B: Normas internacionales para aleaciones de plata y tungsteno

Apéndice C: Estándares de aleación de plata y tungsteno en Europa, América, Japón, Corea del Sur y otros países del mundo

Apéndice D: Terminología de las aleaciones de plata y tungsteno

Referencias



CTIA GROUP LTD Aleación de tungsteno y plata

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD
Silver Tungsten Alloy Introduction

1. Overview of Silver Tungsten Alloy

Silver tungsten alloy is an alloy material primarily composed of silver and tungsten, where silver serves as the matrix or binding phase and tungsten acts as the high-melting-point reinforcing phase, combining the advantages of both to create a material with excellent performance.

2. Features of Silver Tungsten Alloy

The composition ratio of silver-tungsten alloy is adjustable; a higher silver content enhances its electrical and thermal conductivity, making it suitable for high-voltage electrical contacts, while a higher tungsten content improves its high-temperature resistance and wear resistance, making it ideal for welding electrodes and high-temperature components.

3. The Composition Ratio of Silver Tungsten Alloy

Materials	Composition (%weight)	Density (/g.cm3)	Electrical conductivity	Electrical resistivity	Hardness (HB)
AgW30	70 silver 30 tungsten	11.8-12.2	73	2.3	75
AgW40	60 silver 40 tungsten	12.5-12.8	64	2.6	85
AgW50	50 silver 50 tungsten	13.2-13.5	73-56	2.3-3.0	105
AgW55	45 silver 55 tungsten	13.6-13.9	54	3.2	115
AgW60	40 silver 60 tungsten	14.0-14.4	60-50	2.8-3.3	125
AgW65	35 silver 65 tungsten	14.5-14.9	50	3.4	135
AgW70	30 silver 70 tungsten	14.7-15.1	48	3.5	150
AgW80	20 silver 80 tungsten	16.1-16.5	37	4.5	180

4. Production Methods for Silver Tungsten Alloy

The preparation method for tungsten-silver alloy is the same as that for tungsten-copper alloy. Due to tungsten's high melting point and its inability to alloy with silver, traditional methods cannot be used. Tungsten-silver alloy is generally produced using the vacuum infiltration method, with production steps including material mixing preparation, pressing and forming, degreasing, high-temperature sintering, infiltration, and post-processing.

5. Applications of Silver Tungsten Alloy

Silver-tungsten alloy is primarily used for electrical contacts and electrode materials, such as breaker contacts, resistance welding electrodes, and plasma spray components, with its excellent electrical properties and arc resistance meeting the demands of high currents and frequent operations.

6. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: silver-tungsten.net

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Capítulo 1 Conocimientos básicos de la aleación de plata y tungsteno

Como material compuesto de alto rendimiento, la aleación de plata-tungsteno ha demostrado un amplio potencial de aplicación en los sectores eléctrico, electrónico, de defensa e industrial gracias a su excelente conductividad eléctrica y térmica, así como a su resistencia a altas temperaturas y a la corrosión por arco eléctrico. Esta aleación se prepara mediante un proceso de pulvimetalurgia, combinando la alta conductividad eléctrica y térmica de la plata con el alto punto de fusión y la dureza del tungsteno, y cumple con los exigentes requisitos en entornos de alta corriente, alta temperatura y alto desgaste. Con el rápido desarrollo de la electrificación y los equipos de alta potencia, la importancia de la aleación de plata-tungsteno en los campos de los contactos eléctricos, interruptores automáticos y materiales para electrodos ha cobrado cada vez mayor relevancia.

1.1 Concepto de aleación de plata y tungsteno

La aleación de plata-tungsteno es un material compuesto con plata y tungsteno como componentes principales. Se prepara generalmente mediante pulvimetalurgia y se utiliza ampliamente en entornos que requieren alta conductividad, resistencia a la corrosión por arco eléctrico y a altas temperaturas. La plata proporciona una excelente conductividad eléctrica y térmica, mientras que el tungsteno aporta un alto punto de fusión, dureza y resistencia al desgaste, lo que le confiere un excelente rendimiento en entornos de contacto eléctrico y altas temperaturas. El rendimiento de la aleación de plata-tungsteno se puede optimizar ajustando la proporción de plata y tungsteno para satisfacer las necesidades de diferentes aplicaciones, como interruptores de alta tensión, electrodos de soldadura y componentes eléctricos aeroespaciales.

1.1.1 Definición de aleación de tungsteno y plata

La aleación de plata-tungsteno es un material compuesto de plata y tungsteno mediante pulvimetalurgia. La plata se utiliza como matriz o fase aglutinante, y el tungsteno como fase de refuerzo de alto punto de fusión. Las ventajas de ambos se combinan para formar un material de excelente rendimiento. La alta conductividad eléctrica y térmica de la plata la convierten en una matriz conductora ideal, mientras que el alto punto de fusión y la dureza del tungsteno le confieren una excelente resistencia a altas temperaturas y a la corrosión por arco eléctrico. El proceso de preparación suele incluir la mezcla de polvos, el prensado, la sinterización y el posprocesamiento. La plata forma una fase líquida durante el proceso de sinterización, humedece las partículas de tungsteno, rellena los huecos y forma una microestructura densa. La proporción de la composición de la aleación de plata-tungsteno es ajustable. A mayor contenido de plata, mejor conductividad, y a mayor contenido de tungsteno, mayor resistencia al desgaste y a altas temperaturas. Es adecuada para aplicaciones como contactos eléctricos, contactos de interruptores, electrodos de soldadura por resistencia y piezas pulverizadas con plasma. Su no magnetismo y bajo coeficiente de expansión térmica mejoran aún más su aplicabilidad en entornos eléctricos de alta precisión y alta temperatura.

La principal ventaja de la aleación de plata-tungsteno reside en su completo rendimiento. La alta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conductividad de la plata garantiza la eficiencia de la transmisión de corriente y es idónea para sistemas eléctricos de alta tensión; el alto punto de fusión y la resistencia a la corrosión por arco del tungsteno permiten que la aleación se mantenga estable en operaciones de alta corriente o conmutación frecuente, prolongando así su vida útil. La tenacidad y la resistencia al desgaste de la aleación le permiten soportar choques mecánicos y erosión por arco, lo que la hace idónea para entornos eléctricos dinámicos. La flexibilidad del proceso de preparación permite optimizar el rendimiento ajustando la relación plata-tungsteno o añadiendo oligoelementos (como el níquel) para satisfacer los requisitos específicos de la aplicación. La aleación de plata-tungsteno se utiliza ampliamente en los sectores eléctrico e industrial para fabricar contactos y electrodos de alta fiabilidad, especialmente en entornos que requieren alta conductividad y resistencia al arco, como sistemas de energía, conexiones eléctricas aeroespaciales y soldadura industrial.

1.1.2 Diferencias con la aleación de cobre y tungsteno

La aleación de plata y tungsteno (Ag-W) y la aleación de tungsteno y cobre (W-Cu) son materiales compuestos a base de tungsteno preparados mediante pulvimetalurgia y ampliamente utilizados en los campos de gestión eléctrica y térmica, pero existen diferencias significativas entre ambos en composición, rendimiento y escenarios de aplicación.

Composición y preparación : La aleación de plata-tungsteno utiliza plata como matriz o fase de unión y tungsteno como fase de refuerzo. Su alto contenido de plata suele conferirle una excelente conductividad eléctrica. La aleación de tungsteno-cobre utiliza tungsteno como matriz y cobre como fase de unión. Su bajo contenido de cobre mejora la conductividad térmica y el rendimiento del procesamiento. El proceso de sinterización de la aleación de plata-tungsteno se basa en la fase líquida de plata para humedecer las partículas de tungsteno y formar una estructura uniforme y densa. La aleación de tungsteno-cobre se prepara a menudo por infiltración, sinterizando primero el esqueleto de tungsteno y luego infiltrando cobre líquido. Este proceso es más complejo y consume mucha energía. El alto contenido de plata en la aleación de plata-tungsteno la encarece, mientras que la aleación de tungsteno-cobre es más económica debido al menor precio del cobre.

Diferencias de rendimiento : La conductividad eléctrica de la aleación de plata-tungsteno es mejor que la de la aleación de tungsteno-cobre, porque la conductividad eléctrica de la plata es mayor que la del cobre y es adecuada para aplicaciones de contacto eléctrico de alta corriente, como interruptores automáticos y contactos de interruptor. La conductividad térmica de la aleación de tungsteno-cobre es más fuerte, porque la conductividad térmica del cobre es ligeramente mayor que la de la plata y es adecuada para aplicaciones de gestión térmica, como sustratos de disipación de calor electrónico y materiales de electrodos. La resistencia a la corrosión del arco de la aleación de plata-tungsteno es mejor que la de la aleación de tungsteno-cobre, porque el alto punto de fusión y la estabilidad química de la plata la hacen más resistente a la ablación en un entorno de arco, y es adecuada para sistemas eléctricos con conmutación frecuente. La densidad de la aleación de tungsteno-cobre es ligeramente menor que la de la aleación de plata-tungsteno, porque la densidad del cobre es menor que la de la plata, lo que limita su aplicación en aplicaciones que requieren un alto equilibrio de peso. La tenacidad de la aleación de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

plata y tungsteno es ligeramente inferior a la de la aleación de tungsteno y cobre, porque la ductilidad de la plata es menor que la del cobre, pero su dureza y resistencia al desgaste son mayores y es adecuada para escenarios de alto desgaste.

Escenarios de aplicación : La aleación de plata-tungsteno se utiliza principalmente para contactos eléctricos y materiales de electrodos, como contactos de interruptores de alta tensión, electrodos de soldadura por resistencia y piezas pulverizadas con plasma. Su excelente conductividad y resistencia al arco eléctrico satisfacen las necesidades de alta corriente y funcionamiento frecuente. La aleación de tungsteno-cobre se utiliza más ampliamente en componentes de gestión térmica, como sustratos de semiconductores de potencia, disipadores de calor para servidores y revestimientos de toberas de cohetes. Su alta conductividad térmica y rendimiento de procesamiento la hacen más adecuada para entornos de disipación de calor y alta temperatura. La naturaleza no magnética de la aleación de plata-tungsteno le confiere una ventaja en entornos electromagnéticamente sensibles (como equipos de resonancia magnética), mientras que la naturaleza no magnética de la aleación de tungsteno-cobre también es aplicable, pero su menor densidad limita las aplicaciones de blindaje o contrapeso. El alto coste de la aleación de plata-tungsteno limita su aplicación en escenarios sensibles al coste, mientras que la aleación de tungsteno-cobre es más económica y adecuada para la producción en masa.

Resumen de ventajas y desventajas: La aleación de plata-tungsteno es superior a la aleación de tungsteno-cobre en conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión por arco, y es adecuada para contactos eléctricos de alta confiabilidad, pero es más cara y tiene una conductividad térmica ligeramente menor. La aleación de tungsteno-cobre tiene más ventajas en conductividad térmica y rendimiento de procesamiento, y es adecuada para componentes de gestión térmica, pero tiene menor resistencia al arco y densidad. La selección de materiales debe sopesarse según los requisitos de la aplicación. Por ejemplo, la aleación de plata-tungsteno es preferida para contactos eléctricos, mientras que la aleación de tungsteno-cobre es preferida para sustratos de disipación de calor. Las direcciones de optimización incluyen mejorar la tenacidad de la aleación de plata-tungsteno mediante la adición de oligoelementos o el uso de fabricación aditiva para reducir el costo de preparación de la aleación de tungsteno-cobre.

1.1.3 Diferencias con la aleación de tungsteno-molibdeno

La aleación de plata y tungsteno (Ag-W) y la aleación de tungsteno y molibdeno (W-Mo) son materiales compuestos a base de tungsteno, ampliamente utilizados en campos eléctricos y de alta temperatura, pero existen diferencias significativas entre ambos en composición, rendimiento y escenarios de aplicación.

Composición y preparación : La aleación de plata-tungsteno utiliza plata como matriz o fase de unión y tungsteno como fase de refuerzo. Se prepara mediante procesos de pulvimetalurgia (como mezcla de polvos, prensado y sinterización en fase líquida). La plata forma una fase líquida a alta temperatura, humedece las partículas de tungsteno y forma una estructura densa. La aleación de tungsteno-molibdeno se compone principalmente de tungsteno y molibdeno. Por lo general, se prepara mediante pulvimetalurgia o fusión al vacío. El molibdeno, como metal de alto punto de fusión con propiedades similares al tungsteno, mejora la resistencia a altas temperaturas de la aleación. El contenido de plata de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la aleación de plata-tungsteno le da una excelente conductividad, mientras que la aleación de tungsteno-molibdeno no contiene metales preciosos y tiene un costo menor, pero carece de una matriz conductora. El proceso de preparación de la aleación de tungsteno-molibdeno requiere una temperatura de sinterización más alta porque el punto de fusión del molibdeno es ligeramente inferior al del tungsteno y el control del proceso es más complicado.

Diferencias de rendimiento : La conductividad eléctrica y térmica de la aleación de plata-tungsteno son mucho mejores que las de la aleación de tungsteno-molibdeno, porque la adición de plata mejora significativamente la conductividad eléctrica y la eficiencia de la conducción térmica, y es adecuada para contactos eléctricos y aplicaciones de electrodos. La conductividad eléctrica y térmica de la aleación de tungsteno-molibdeno son pobres, dependiendo principalmente de las propiedades inherentes del tungsteno y el molibdeno, y son adecuadas para componentes estructurales en lugar de aplicaciones eléctricas. La aleación de plata-tungsteno tiene una excelente resistencia a la corrosión por arco, porque la estabilidad química de la plata la hace resistente a la ablación bajo arcos de alta corriente, mientras que la aleación de tungsteno-molibdeno se oxida fácilmente en entornos de arco y tiene una resistencia a la corrosión débil. La aleación de tungsteno-molibdeno tiene una resistencia ligeramente mejor y resistencia a altas temperaturas, porque el molibdeno mejora las propiedades mecánicas a altas temperaturas, y es adecuada para entornos de temperaturas extremadamente altas (como toberas aeroespaciales). La densidad de la aleación de plata y tungsteno es mayor que la de la aleación de tungsteno y molibdeno, y es adecuada para aplicaciones que requieren un alto equilibrio de peso, mientras que la aleación de tungsteno y molibdeno tiene una densidad menor.

Escenarios de aplicación : La aleación de plata-tungsteno se utiliza principalmente para contactos eléctricos, contactos de interruptores automáticos y electrodos de soldadura por resistencia. Su alta conductividad y resistencia al arco satisfacen las necesidades de los sistemas eléctricos de alto voltaje, como interruptores de potencia y conexiones eléctricas aeroespaciales. La aleación de tungsteno-molibdeno se utiliza más comúnmente en componentes estructurales de alta temperatura, como toberas de motores de cohetes, partes internas de hornos y moldes de alta temperatura, debido a su excelente resistencia y fuerza a altas temperaturas. La aleación de plata-tungsteno tiene ventajas en los campos médico y electrónico, mientras que la aleación de tungsteno-molibdeno es más adecuada para escenarios de temperaturas extremadamente altas y cargas mecánicas. El costo de la aleación de plata-tungsteno es más alto debido a la adición de plata, lo que limita su uso en aplicaciones estructurales a gran escala, mientras que la aleación de tungsteno-molibdeno es más económica debido a su menor costo.

Resumen de ventajas y desventajas : La aleación de plata-tungsteno es superior a la aleación de tungsteno-molibdeno en términos de conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión por arco eléctrico y contrapeso de alta densidad, y es adecuada para aplicaciones eléctricas de alta confiabilidad, pero es más cara y ligeramente inferior en resistencia a temperaturas extremadamente altas. La aleación de tungsteno-molibdeno tiene ventajas en resistencia a altas temperaturas y rentabilidad, y es adecuada para componentes estructurales de alta temperatura, pero su conductividad eléctrica y resistencia al arco eléctrico son insuficientes. La selección de materiales debe sopesarse según los requisitos de la aplicación. Por ejemplo, la aleación de plata-tungsteno es preferida para contactos eléctricos, y la aleación de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno-molibdeno es preferida para componentes estructurales de alta temperatura. Las direcciones de optimización incluyen mejorar la resistencia a altas temperaturas de la aleación de plata-tungsteno mediante la adición de oligoelementos, o utilizando tecnología de sinterización avanzada para aumentar la densidad de la aleación de tungsteno-molibdeno.

1.2 Historia del desarrollo de la aleación de plata y tungsteno

El desarrollo de la aleación de plata-tungsteno refleja la evolución coordinada de la ciencia de los materiales y las necesidades industriales. Desde sus primeras exploraciones hasta los avances en aplicaciones modernas de alto rendimiento, ha pasado por múltiples etapas de preparación de materiales, optimización del rendimiento y expansión de aplicaciones.

1.2.1 Etapa de exploración temprana

Las primeras exploraciones de las aleaciones de plata y tungsteno comenzaron a principios del siglo XX, cuando el auge de la industria eléctrica creó una necesidad urgente de materiales de contacto de alto rendimiento. Los primeros equipos eléctricos (como interruptores y relés) solían utilizar plata o cobre puros como materiales de contacto, pero estos materiales son propensos a la erosión por arco eléctrico y a la adhesión bajo altas corrientes o frecuentes operaciones de conmutación, tienen una vida útil corta y una baja fiabilidad. Se cree que el tungsteno mejora la resistencia al arco eléctrico de los contactos debido a su alto punto de fusión y dureza, pero el tungsteno puro presenta baja conductividad y es difícil de procesar. Los investigadores comenzaron a intentar combinar plata con tungsteno, aprovechando la conductividad de la plata y la resistencia a altas temperaturas del tungsteno para desarrollar materiales compuestos que combinan ambas.

La preparación inicial adoptó principalmente procesos simples de mezcla de polvo, prensado y sinterización. La relación plata-tungsteno era difícil de controlar con precisión, la microestructura de la aleación era desigual y la estabilidad del rendimiento era insuficiente. Los primeros experimentos se centraron en aleaciones con bajo contenido de plata, tratando de equilibrar el costo y el rendimiento, pero la conductividad era pobre, lo que limitaba el ámbito de aplicación. Los desafíos en la etapa de exploración incluyeron la mezcla desigual de polvo, la alta porosidad de sinterización y la tecnología de procesamiento atrasada, lo que resultó en un rendimiento de la aleación que no podía satisfacer las necesidades industriales. A pesar de esto, el potencial de la aleación de plata-tungsteno ha emergido gradualmente en aplicaciones de electrodos y contactos eléctricos, sentando las bases para avances tecnológicos posteriores. La investigación inicial se concentró principalmente en laboratorios y experimentos a pequeña escala, aplicados a interruptores eléctricos simples y electrodos industriales, marcando la transición de la aleación de plata-tungsteno del concepto a la aplicación inicial.

1.2.2 Avances tecnológicos e inicio de aplicaciones industriales

A mediados del siglo XX, con el rápido desarrollo de la tecnología pulvimetalúrgica y la industria eléctrica, la aleación de plata y tungsteno marcó el comienzo de una etapa de avances tecnológicos y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aplicaciones industriales. Los procesos pulvimetalúrgicos avanzados, como la sinterización en fase líquida y el prensado en caliente, han mejorado significativamente la densidad y la consistencia del rendimiento de la aleación. La sinterización en fase líquida humedece las partículas de tungsteno, rellena los microporos y forma una microestructura uniforme mediante el flujo de plata líquida a alta temperatura, mejorando considerablemente la conductividad y la resistencia al arco eléctrico. Los investigadores optimizaron la relación plata-tungsteno y descubrieron que las aleaciones con alto contenido de plata presentan una mejor conductividad y son adecuadas para contactos eléctricos de alta tensión, mientras que las aleaciones con alto contenido de tungsteno son más resistentes al desgaste y a las altas temperaturas, lo que las hace adecuadas para materiales de electrodos.

Los avances en la tecnología de preparación han impulsado la producción industrial de aleaciones de plata-tungsteno. La introducción de la sinterización al vacío y la tecnología de protección con gas inerte ha reducido los problemas de oxidación, mejorado la pureza y la no magnetización de la aleación, y ha satisfecho las necesidades de aplicaciones con altos requisitos de compatibilidad electromagnética. La aplicación de tecnologías de mecanizado de precisión (como la electroerosión y el fresado CNC) permite fabricar contactos y electrodos de formas complejas, ampliando la aplicación de las aleaciones en interruptores automáticos de alta tensión, soldadura por resistencia y sistemas eléctricos aeroespaciales. El inicio de las aplicaciones industriales también se benefició del rápido desarrollo de los sistemas de energía y las industrias manufactureras. La urgente demanda de materiales resistentes al arco eléctrico y altamente conductores en aparatos de alta tensión y equipos de soldadura automatizados ha impulsado la comercialización de las aleaciones de plata-tungsteno. Durante esta etapa, la aleación de plata-tungsteno se empezó a utilizar ampliamente en contactos de interruptores de alta tensión, contactos de relés y electrodos de soldadura por resistencia. Su excelente resistencia a la corrosión por arco y conductividad eléctrica prolongaron significativamente la vida útil de los equipos y mejoraron su fiabilidad operativa. El sector aeroespacial también empezó a utilizar la aleación de plata-tungsteno para fabricar componentes de conexión eléctrica, aprovechando sus propiedades no magnéticas y de alta densidad para optimizar el rendimiento del sistema. Los avances tecnológicos también incluyen la mejora de la tenacidad y las propiedades de procesamiento de la aleación mediante la adición de oligoelementos (como el níquel o el cobalto), lo que amplía aún más su ámbito de aplicación. El inicio de la aplicación industrial marca la transición de la aleación de plata-tungsteno del laboratorio a la producción a gran escala, sentando las bases para su amplia aplicación en los campos eléctricos modernos y de alta temperatura. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de una tecnología de sinterización más eficiente y métodos de preparación de bajo coste para afrontar el reto del elevado coste de la plata.

1.2.3 Innovación tecnológica moderna

Con la llegada del siglo XXI, la investigación, el desarrollo y la aplicación de aleaciones de plata-tungsteno han marcado el comienzo de una ola de innovación tecnológica moderna, beneficiándose del progreso de la ciencia de los materiales, la tecnología de fabricación y las necesidades de aplicación. La innovación tecnológica moderna se centra principalmente en tres aspectos: la optimización del proceso de preparación, la mejora del rendimiento y la expansión de los escenarios de aplicación. La tecnología pulvimetalúrgica avanzada, como la sinterización por plasma de chispa (SPS), acorta significativamente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

el tiempo de sinterización, reduce el crecimiento del grano y mejora la densidad y la consistencia del rendimiento de la aleación mediante un calentamiento rápido con corriente pulsada y alta presión. Esta tecnología uniformiza la microestructura de la aleación de plata-tungsteno, mejora la conductividad y la resistencia a la corrosión por arco eléctrico, y es adecuada para contactos eléctricos de alta precisión y aplicaciones de electrodos. El desarrollo de la nanotecnología ha impulsado la aplicación del polvo de plata-tungsteno a escala nanométrica. La elevada superficie específica de las nanopartículas mejora el efecto de sinterización en fase líquida, mejora aún más la resistencia, la tenacidad y la conductividad térmica de la aleación, y es adecuada para componentes eléctricos miniaturizados y electrodos de alta temperatura.

La tecnología de fabricación aditiva (impresión 3D) ha supuesto un cambio revolucionario en la preparación de aleaciones de plata-tungsteno. Mediante la fusión selectiva por láser (SLM) o la fusión por haz de electrones, se pueden preparar directamente contactos o electrodos con geometrías complejas, lo que reduce el desperdicio de material del procesamiento tradicional y permite un diseño personalizado para satisfacer las necesidades de los equipos aeroespaciales y médicos.

Las tecnologías de modificación de superficies, como los nanorrecubrimientos (como TiN o DLC) aplicados mediante deposición química en fase de vapor asistida por plasma (PECVD), mejoran significativamente la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión por arco de la aleación, prolongando así la vida útil de los contactos de interruptores automáticos de alta tensión y los electrodos de soldadura. La aplicación de tecnologías de fabricación ecológica, como el uso de aglutinantes respetuosos con el medio ambiente y los procesos de sinterización de bajo consumo energético, reduce el consumo de energía y las emisiones en el proceso de producción y promueve el desarrollo sostenible de las aleaciones de plata-tungsteno.

Las innovaciones tecnológicas modernas también incluyen un diseño inteligente y funcional. La tecnología de monitoreo inteligente detecta el desgaste por arco eléctrico y los cambios de temperatura en los contactos de aleación de plata-tungsteno en tiempo real mediante la integración de sensores, optimizando los ciclos de mantenimiento y mejorando la confiabilidad del equipo. El desarrollo de materiales de gradiente funcional (FGM) permite que las aleaciones de plata-tungsteno presenten propiedades de gradiente en diferentes áreas, como un alto contenido de plata en la superficie para mejorar la conductividad y un alto contenido de tungsteno en el interior para mejorar la resistencia a altas temperaturas, lo cual resulta adecuado para componentes eléctricos multifuncionales.

Estas innovaciones tecnológicas han mejorado significativamente el rendimiento de las aleaciones de plata-tungsteno y han ampliado sus aplicaciones en nuevas energías (como contactos de pilas de carga para vehículos eléctricos), comunicaciones 5G (módulos de radiofrecuencia) y defensa nacional (electrodos de radar). Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de una tecnología de preparación de nanopulvos más eficiente, la exploración de recubrimientos autorreparables para hacer frente al desgaste por arco eléctrico y la integración de inteligencia artificial para optimizar los parámetros de preparación. En el futuro, se espera que las aleaciones de plata-tungsteno alcancen mayores avances en sistemas eléctricos inteligentes y entornos extremos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.3 Importancia y trascendencia de la investigación industrial

La investigación industrial sobre aleaciones de plata-tungsteno desempeña un papel fundamental en el desarrollo de la ciencia de los materiales y su aplicación en diversos campos. Mediante un estudio exhaustivo de su proceso de preparación, la optimización del rendimiento y los mecanismos de fallo, no solo se puede mejorar el rendimiento y la fiabilidad de la aleación, sino también impulsar la innovación y el progreso en las industrias relacionadas. Mediante la cooperación interdisciplinaria, la investigación industrial combina la ciencia de los materiales, la ingeniería eléctrica y la tecnología de fabricación para proporcionar soporte teórico y garantía técnica para la aplicación de las aleaciones de plata-tungsteno en los campos eléctrico, electrónico y de defensa de alto rendimiento.

1.3.1 Promoción del desarrollo de la ciencia de los materiales

La investigación sobre la aleación de plata-tungsteno tiene un profundo impacto en el desarrollo de la ciencia de los materiales. En primer lugar, como un representante típico de los materiales compuestos, el progreso de su proceso de preparación (como la pulvimetalurgia, la nanotecnología y la fabricación aditiva) ha promovido el diseño y desarrollo de materiales compuestos de alto rendimiento. Al optimizar la relación plata-tungsteno, introducir nanoestructuras y el diseño de gradientes funcionales, los investigadores han explorado los límites de rendimiento de los compuestos metálicos, proporcionando referencias teóricas y prácticas para otras aleaciones de alto rendimiento. El estudio del mecanismo de sinterización y la evolución de la microestructura de la aleación de plata-tungsteno ha profundizado la comprensión de la sinterización en fase líquida y la unión de interfaces, y ha promovido la innovación en la tecnología de pulvimetalurgia. En segundo lugar, la investigación sobre la resistencia a la corrosión por arco y el rendimiento a altas temperaturas de las aleaciones de plata-tungsteno ha impulsado el desarrollo de materiales resistentes a entornos extremos. Mediante el análisis del comportamiento superficial y la distribución de la tensión térmica bajo la acción del arco, los investigadores han desarrollado nuevos recubrimientos y tecnologías de modificación superficial para mejorar la estabilidad de los materiales en entornos de alta corriente y alta temperatura. Estos resultados pueden aplicarse al diseño de otras aleaciones de alta temperatura y materiales eléctricos. Además, la investigación sobre tecnologías de fabricación ecológica, como la sinterización de bajo consumo energético y el reciclaje de residuos, ha incorporado el concepto de desarrollo sostenible a la ciencia de los materiales, reduciendo el desperdicio de recursos y el impacto ambiental. La investigación sobre aleaciones de plata-tungsteno también ha promovido la integración interdisciplinaria, combinada con la ciencia computacional de los materiales y la inteligencia artificial para optimizar el diseño de materiales, y ha acelerado la transformación de nuevos materiales del laboratorio a la aplicación industrial. En el futuro, se espera que la investigación sobre aleaciones de plata-tungsteno impulse el desarrollo de materiales compuestos más inteligentes y respetuosos con el medio ambiente, revitalizando la ciencia de los materiales.

1.3.2 Valor de aplicación en diversos campos

La investigación industrial sobre aleaciones de plata-tungsteno demuestra un valor significativo en aplicaciones en los sectores eléctrico, electrónico, de defensa, aeroespacial y médico. En el campo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eléctrico, su alta conductividad y resistencia a la corrosión por arco eléctrico las convierten en materiales ideales para interruptores automáticos, relés y contactos de interruptores de alta tensión. La investigación ha mejorado la fiabilidad y la vida útil de los sistemas de energía al optimizar las propiedades de las aleaciones, satisfaciendo así las necesidades de las redes inteligentes y los dispositivos de alta potencia. En el campo de la electrónica, las aleaciones de plata-tungsteno se utilizan en módulos de radiofrecuencia (RF) y contactos de semiconductores de potencia. Su excelente conductividad térmica y sus propiedades no magnéticas impulsan el desarrollo de las comunicaciones 5G y los equipos informáticos de alto rendimiento.

En los campos de defensa y aeroespacial, la resistencia a altas temperaturas y la alta densidad de la aleación de plata-tungsteno la hacen indispensable en electrodos de radar, conexiones eléctricas de misiles y componentes de contrapeso de naves espaciales. La investigación ha optimizado el rendimiento de los componentes mediante el diseño de gradientes funcionales y la fabricación aditiva, mejorando la precisión y la fiabilidad del sistema. En el campo médico, la no magnetización y la biocompatibilidad de la aleación de plata-tungsteno la hacen adecuada para contactos de equipos de resonancia magnética y piezas de blindaje de radioterapia. La investigación ha garantizado la seguridad y la alta precisión de la aleación mediante la fabricación ecológica y el mecanizado de precisión. El valor de la investigación industrial también se refleja en el fomento de la colaboración intersectorial. Mediante la combinación con la ingeniería eléctrica, la tecnología de gestión térmica y la fabricación inteligente, los escenarios de aplicación de la aleación de plata-tungsteno están en constante expansión, como los sistemas de carga de vehículos de nuevas energías y los equipos de energías renovables. Las direcciones de optimización incluyen el desarrollo de procesos de preparación de bajo coste, la exploración de materiales compuestos multifuncionales y la integración de tecnologías de monitorización inteligente para mejorar la fiabilidad de las aplicaciones.



CTIA GROUP LTD Aleación de tungsteno y plata

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 2 Composición y características de la aleación de plata y tungsteno

Como material compuesto de alto rendimiento, la aleación de plata-tungsteno tiene un amplio potencial de aplicación en los sectores eléctrico, electrónico, de defensa e industrial gracias a su excelente conductividad eléctrica y térmica, así como a su resistencia a altas temperaturas y a la corrosión por arco eléctrico. Esta aleación se prepara mediante un proceso de pulvimetalurgia, utilizando plata (Ag) como matriz o fase aglutinante, lo que le proporciona una alta conductividad eléctrica y térmica, y tungsteno (W) como fase de refuerzo, lo que le confiere un alto punto de fusión y dureza, y cumple con los exigentes requisitos de entornos de alta corriente, alta temperatura o alto desgaste. El rendimiento de la aleación de plata-tungsteno depende directamente de las propiedades físicas y químicas de sus componentes principales, plata y tungsteno, y del efecto sinérgico entre ambos.

2.1 Características de la plata y el tungsteno

El rendimiento de [la aleación de plata-tungsteno](#) se deriva de las propiedades físicas y químicas únicas de la plata y el tungsteno. Su complementariedad le confiere un excelente rendimiento en contactos eléctricos, electrodos de soldadura y componentes de alta temperatura. La plata proporciona una excelente conductividad eléctrica y térmica, lo que garantiza una eficiente transferencia de corriente y calor; el alto punto de fusión, la dureza y la resistencia a la corrosión por arco del tungsteno mejoran la estabilidad de la aleación en entornos extremos. Ambos se combinan mediante pulvimetalurgia para formar una microestructura densa que satisface las necesidades de aplicaciones de alta fiabilidad.

2.1.1 Propiedades físicas y químicas de la plata

La plata (Ag) es un metal precioso único entre los materiales metálicos por su excelente conductividad eléctrica y térmica. Es la matriz o fase de enlace clave en las aleaciones de plata y tungsteno. La plata posee una conductividad eléctrica extremadamente alta, puede transmitir corriente eficientemente y reducir las pérdidas de resistencia, lo que la convierte en una opción ideal para contactos eléctricos y materiales de electrodos. La plata también posee una excelente conductividad térmica, lo que ayuda a dispersar rápidamente el calor generado durante el funcionamiento de los componentes y evita que el sobrecalentamiento provoque una degradación del rendimiento. En comparación con el tungsteno, su punto de fusión más bajo facilita la formación de un líquido durante el proceso de sinterización en fase líquida de la pulvimetalurgia, humedeciendo partículas de tungsteno, rellenando huecos microscópicos y formando una estructura de aleación densa, mejorando así la conductividad y la estabilidad estructural.

La plata posee una gran estabilidad química y capacidad antioxidante, lo que dificulta su reacción con el oxígeno a temperatura ambiente, manteniendo una superficie lisa y propiedades conductoras. Sin embargo, en entornos con altas temperaturas o azufre, la plata puede sufrir una ligera oxidación o sulfuración, lo que resulta en un ligero aumento de la resistencia superficial, lo que afecta su rendimiento a largo plazo. La plata posee buena ductilidad y tenacidad, y puede absorber la tensión bajo choques mecánicos o arcos eléctricos, reduciendo el riesgo de grietas en la aleación en entornos de alta corriente. La plata tiene una densidad moderada, lo que proporciona una base de peso específica para las aleaciones

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de plata y tungsteno y es adecuada para aplicaciones que requieren contrapesos. Las propiedades no magnéticas de la plata garantizan que la aleación no interfiera en entornos electromagnéticamente sensibles (como equipos de resonancia magnética o sistemas de radar), lo que mejora su aplicabilidad en sistemas eléctricos de alta precisión.

En la aleación de plata-tungsteno, la plata, como fase conductora y termoconductora, mejora significativamente la eficiencia de transmisión de corriente y la capacidad de gestión térmica de la aleación, lo que la hace especialmente adecuada para aplicaciones como contactos de interruptores automáticos de alta tensión, relés y electrodos de soldadura por resistencia. Su estabilidad química contribuye a la durabilidad de la aleación en entornos de conmutación frecuente o formación de arcos eléctricos, pero requiere un tratamiento superficial o la optimización de componentes para abordar problemas de oxidación o corrosión a alta temperatura. El alto coste de la plata es su limitación, y es necesario equilibrar el rendimiento y la economía mediante proporciones razonables y tecnología de fabricación ecológica.

2.1.2 Propiedades físicas y químicas del tungsteno

El tungsteno (W) es un metal de transición con un alto punto de fusión. Gracias a su punto de fusión, dureza y densidad extremadamente altos, se utiliza como fase de refuerzo en aleaciones de plata-tungsteno para mejorar significativamente su resistencia a altas temperaturas y a la corrosión por arco. El tungsteno tiene un punto de fusión extremadamente alto y puede soportar entornos de temperaturas extremadamente altas (como arcos eléctricos o procesos de soldadura), lo que le permite mantener la estabilidad estructural en aplicaciones de alta corriente y temperatura. Su altísima dureza le confiere a la aleación una excelente resistencia al desgaste y al impacto mecánico, lo que la hace adecuada para aplicaciones de alto desgaste, como electrodos de soldadura por resistencia y piezas pulverizadas con plasma. La alta densidad del tungsteno proporciona una ventaja de peso a la aleación, lo que la hace adecuada para aplicaciones de contrapeso o blindaje, como componentes de conexión eléctrica aeroespacial.

Menor conductividad eléctrica y térmica que la plata, pero su adición mejora significativamente la resistencia de la aleación a la corrosión por arco. Bajo la acción del arco, el alto punto de fusión del tungsteno y su estabilidad química lo hacen menos propenso a la ablación o fusión, lo que prolonga la vida útil de los contactos y electrodos. El tungsteno tiene buena estabilidad química y resiste la corrosión a temperatura ambiente y en entornos neutros, pero puede formar óxidos en entornos oxidantes o ácidos de alta temperatura, lo que afecta las propiedades superficiales. El bajo coeficiente de expansión térmica del tungsteno garantiza la estabilidad dimensional de la aleación durante los ciclos térmicos y es adecuado para componentes de alta precisión, como contactos de interruptores de alto voltaje. Las propiedades no magnéticas del tungsteno son consistentes con las de la plata, lo que respalda la aplicación de la aleación en entornos electromagnéticamente sensibles.

En la aleación de plata-tungsteno, el tungsteno como fase de refuerzo mejora significativamente su resistencia a altas temperaturas, al desgaste y al arco eléctrico, lo que le permite operar de forma estable

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en entornos eléctricos hostiles. La alta dureza y densidad del tungsteno mejoran la resistencia mecánica y el equilibrio de peso de la aleación, pero su menor conductividad debe compensarse con el efecto matriz de la plata. El tungsteno es difícil de procesar, y sus formas complejas deben lograrse mediante pulvimetalurgia y tecnología de mecanizado de precisión. Las líneas de optimización incluyen la mejora de la eficiencia de sinterización mediante polvo de tungsteno a escala nanométrica o la adición de oligoelementos (como el níquel) para mejorar la tenacidad. El efecto sinérgico de la plata y el tungsteno confiere a la aleación de plata-tungsteno ventajas únicas en los campos eléctrico, electrónico y de defensa, satisfaciendo las necesidades de aplicaciones de alto rendimiento.

2.1.3 Composición del tungsteno y la plata

La aleación de plata-tungsteno se compone principalmente de plata (Ag) y tungsteno (W), y suele prepararse mediante pulvimetalurgia. La plata se utiliza como matriz conductora y termoconductora, y el tungsteno como fase de refuerzo para la resistencia a altas temperaturas y al desgaste. La proporción de plata y tungsteno afecta directamente la conductividad, la conductividad térmica, la dureza, la resistencia a la corrosión por arco y la densidad de la aleación, y puede ajustarse según los requisitos específicos de la aplicación. Un mayor contenido de plata, la aleación presenta mejor conductividad y conductividad térmica, lo que la hace adecuada para contactos eléctricos de alta tensión; un mayor contenido de tungsteno, la aleación presenta mayor resistencia a altas temperaturas y al desgaste, lo que la hace adecuada para electrodos de soldadura y piezas de alta temperatura. En ocasiones, se utilizan aditivos traza (como níquel o cobalto) para mejorar la tenacidad o el rendimiento del procesamiento, pero requieren un control estricto para mantener la no magnetización y la estabilidad del rendimiento. La siguiente tabla muestra el rango de composición típico de la aleación de plata-tungsteno y sus propiedades.

Material	Composición (porcentaje en peso)	Densidad (g/ cm ³)	Conductividad eléctrica	Resistividad	Dureza (HB)
AgW30	Plata 70%, Tungsteno 30%	11.8-12.2	73	2.3	75
AgW40	Plata 60%, Tungsteno 40%	12.5-12.8	64	2.6	85
AgW50	Plata 50%, Tungsteno 50%	13.2-13.5	56-73	2.3-3.0	105
AgW55	Plata 45%, Tungsteno 55%	13.6-13.9	54	3.2	115
AgW60	Plata 40%, Tungsteno 60%	14.0-14.4	50-60	2.8-3.3	125
AgW65	Plata 35%, Tungsteno 65%	14.5-14.9	50	3.4	135
AgW70	Plata 30%, Tungsteno 70%	14.7-15.1	48	3.5	150
AgW75	Plata 25%, Tungsteno 75%	15.4-15.8	45-52	3.2-3.7	165
AgW80	Plata 20%, Tungsteno 80%	16.1-16.5	37	4.5	180

Características y funciones de la composición : La plata actúa como matriz o fase de enlace en la aleación. Su alta conductividad eléctrica y térmica garantiza una transmisión de corriente y una gestión térmica eficientes, y es especialmente adecuada para aplicaciones que requieren baja resistencia y alta eficiencia de disipación térmica, como los contactos de interruptores de alta tensión. La humectabilidad de la plata en fase líquida promueve la unión de las partículas de tungsteno durante el proceso de

sinterización, formando una microestructura densa y mejorando la consistencia del rendimiento de la aleación.

El tungsteno se utiliza como fase de refuerzo. Su alto punto de fusión y dureza permiten que la aleación se mantenga estable en arcos de alta corriente o entornos de alta temperatura. Su resistencia a la corrosión por arco y al desgaste lo hacen adecuado para contactos eléctricos y electrodos de soldadura que se cambian con frecuencia. La alta densidad del tungsteno proporciona una función de contrapeso a la aleación, lo que la hace adecuada para componentes de conexión eléctrica aeroespacial. Los aditivos traza mejoran la viabilidad de fabricación de componentes de formas complejas al mejorar el efecto de sinterización en fase líquida y la tenacidad de la aleación, pero se requiere un control preciso para evitar la introducción de magnetismo o la reducción de la conductividad.

Impacto en el rendimiento y aplicación : El aumento del contenido de plata mejora significativamente la conductividad eléctrica y térmica, pero puede reducir la dureza y la resistencia al desgaste, lo cual es adecuado para escenarios que requieren una alta transmisión de corriente; el aumento del contenido de tungsteno mejora la resistencia a altas temperaturas y la resistencia al arco, pero reduce la conductividad eléctrica, lo cual es adecuado para entornos de alta temperatura y alto desgaste. La optimización de la relación de la composición debe sopesarse según los requisitos de la aplicación. Por ejemplo, los contactos de los interruptores automáticos de alto voltaje tienden a tener un alto contenido de plata para garantizar la conductividad, mientras que los electrodos de soldadura por resistencia prefieren un alto contenido de tungsteno para mejorar la resistencia al desgaste. El coeficiente de expansión térmica bajo y no magnético de la aleación le da ventajas en escenarios electromagnéticamente sensibles y de alta precisión (como equipos de MRI y sistemas de radar). Durante el proceso de preparación, se utilizan molienda de bolas de alta energía, sinterización en fase líquida y prensado isostático en caliente (HIP) para garantizar la uniformidad y densidad de la composición para cumplir con los requisitos de alta confiabilidad. Las líneas de optimización incluyen la mejora de la consistencia del rendimiento mediante polvos a escala nanométrica, la optimización de la distribución de plata-tungsteno mediante un diseño de gradiente funcional o el desarrollo de tecnologías de fabricación ecológicas para reducir el coste de la plata. La flexibilidad compositiva de las aleaciones de plata-tungsteno les confiere una amplia gama de aplicaciones en los sectores eléctrico, electrónico y de defensa.

2.2 Efecto de la relación de composición de la aleación de plata y tungsteno

La proporción de composición de la aleación de plata-tungsteno es un factor clave que afecta sus propiedades mecánicas y rendimiento de aplicación. La proporción de plata (Ag) y tungsteno (W) determina directamente la resistencia a la flexión, la tenacidad, la conductividad eléctrica, la conductividad térmica y la resistencia a la corrosión por arco de la aleación. Al ajustar la proporción de plata-tungsteno, se puede lograr un equilibrio entre la conductividad y las propiedades mecánicas para satisfacer las necesidades de diferentes escenarios de aplicación. Cuando el contenido de plata es alto, la conductividad y la tenacidad de la aleación se mejoran, lo que es adecuado para contactos eléctricos de alta corriente; cuando el contenido de tungsteno es alto, la resistencia a la flexión y la resistencia a altas temperaturas de la aleación se mejoran, lo que es adecuado para electrodos de soldadura y piezas de alto

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

desgaste. Los efectos específicos de la proporción de plata-tungsteno en la resistencia a la flexión y la tenacidad se analizarán en detalle a continuación.

2.2.1 Efecto de la relación plata-tungsteno en la resistencia a la flexión de la aleación

plata -tungsteno tiene un efecto significativo en la resistencia a la flexión de la aleación, es decir, su capacidad para resistir la deformación o fractura bajo cargas de flexión, y está directamente relacionada con su fiabilidad en entornos de tensión mecánica. Cuando el contenido de plata es alto, la resistencia a la flexión de la aleación es baja, ya que la ductilidad y la baja dureza de la plata dificultan la resistencia a grandes tensiones de flexión, y es adecuada para aplicaciones de contacto eléctrico con bajas cargas dinámicas. La plata, como matriz o fase aglutinante, humedece las partículas de tungsteno durante el proceso de sinterización en fase líquida. Si bien mejora la densidad de la estructura, su baja resistencia limita el rendimiento de la aleación en entornos de alta tensión. Con el aumento del contenido de tungsteno, la resistencia a la flexión aumenta significativamente, ya que la alta dureza y el alto punto de fusión del tungsteno confieren a la aleación mayor rigidez y resistencia a la deformación. Las partículas de tungsteno forman una estructura de esqueleto en la aleación, lo que mejora la resistencia mecánica general del material. Especialmente con un alto contenido de tungsteno, la resistencia a la flexión alcanza un pico que es adecuado para piezas que requieren alta resistencia al desgaste y estabilidad estructural.

plata -tungsteno también afecta la uniformidad de la microestructura. Un contenido de plata demasiado alto puede provocar una dispersión desigual de las partículas de tungsteno y reducir la estabilidad de la resistencia a la flexión; un contenido de tungsteno demasiado alto puede formar poros debido a una fase líquida de plata insuficiente, lo que afecta la uniformidad de las propiedades mecánicas. La optimización de los procesos de sinterización (como la sinterización en fase líquida y el prensado isostático en caliente) puede aliviar estos problemas y mejorar la resistencia a la flexión al aumentar la densidad y reducir los defectos. La mejora de la resistencia a la flexión permite que las aleaciones de plata-tungsteno tengan un buen rendimiento en electrodos de soldadura por resistencia, piezas pulverizadas con plasma y contrapesos aeroespaciales, y que resistan impactos y vibraciones mecánicas. Las direcciones de optimización incluyen la mejora de la distribución de partículas a través de polvo de tungsteno a escala nanométrica o el aumento del contenido de tungsteno en la superficie mediante un diseño de gradiente funcional para mejorar el rendimiento a la flexión. El ajuste razonable de la relación plata-tungsteno proporciona un importante soporte para aplicaciones de alta fiabilidad, especialmente en escenarios en los que deben tenerse en cuenta tanto la conductividad como la resistencia mecánica.

2.2.2 Efecto de la relación plata-tungsteno en la tenacidad de la aleación

plata -tungsteno influye significativamente en la tenacidad de la aleación, que se refiere a su capacidad para absorber energía y resistir fracturas, y determina su durabilidad ante impactos o arcos eléctricos. Un mayor contenido de plata mejora la tenacidad de la aleación, ya que su ductilidad y plasticidad absorben impactos mecánicos y tensiones térmicas, reduciendo así el riesgo de propagación de grietas. Esta propiedad hace que las aleaciones de plata-tungsteno con alto contenido de plata sean adecuadas para aplicaciones eléctricas que requieren conmutaciones frecuentes, como contactos de interruptores

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

automáticos de alta tensión y contactos de relés. La tenacidad de la plata ayuda a aliviar la concentración de tensiones causada por los arcos eléctricos y a prolongar la vida útil de los componentes. Sin embargo, su menor dureza puede causar deformación en entornos de alto desgaste, lo que limita su rendimiento bajo cargas mecánicas extremas.

A medida que aumenta el contenido de tungsteno, la tenacidad de la aleación disminuye gradualmente, porque la alta dureza y fragilidad del tungsteno debilitan la capacidad del material para deformarse plásticamente. El alto contenido de tungsteno hace que la aleación sea más rígida y adecuada para aplicaciones con resistencia a altas temperaturas y resistencia a la corrosión por arco, como electrodos de soldadura y moldes de alta temperatura, pero su menor tenacidad puede causar microfisuras durante el impacto o los ciclos térmicos. El efecto humectante de la plata como fase aglutinante alivia la fragilidad entre las partículas de tungsteno hasta cierto punto, pero cuando el contenido de tungsteno es demasiado alto, la fase líquida insuficiente puede causar microdefectos, reduciendo aún más la tenacidad. La optimización del proceso de sinterización, como la sinterización por plasma de chispa (SPS) o la adición de oligoelementos, puede mejorar la microestructura y aumentar la tenacidad, especialmente en aleaciones con alto contenido de tungsteno.

Los cambios en la tenacidad afectan directamente los escenarios de aplicación de las aleaciones de plata-tungsteno. Las aleaciones con alto contenido de plata son adecuadas para entornos eléctricos dinámicos, como interruptores de redes inteligentes y módulos electrónicos de radiofrecuencia, debido a su excelente tenacidad; las aleaciones con alto contenido de tungsteno son adecuadas para piezas estáticas o de alto desgaste, como contrapesos aeroespaciales y piezas pulverizadas con plasma, debido a su alta resistencia a la temperatura y dureza. Las direcciones de optimización incluyen mejorar la dispersabilidad de las partículas de tungsteno mediante diseño nanoestructurado o desarrollar recubrimientos compuestos para mejorar la tenacidad superficial. El ajuste de la relación plata-tungsteno debe equilibrar la tenacidad y la dureza según los requisitos de la aplicación. Por ejemplo, aumente la relación de plata en escenarios que requieren resistencia al impacto y aumente la relación de tungsteno en escenarios que requieren resistencia a altas temperaturas. Un control razonable de la relación de componentes y el proceso de preparación permite que las aleaciones de plata-tungsteno muestren un excelente rendimiento integral en los campos eléctrico, electrónico y de defensa.

2.2.3 Efecto de la relación plata-tungsteno en la conductividad de la aleación

plata -tungsteno tiene un efecto significativo en la conductividad de la aleación, un indicador clave de su capacidad para transmitir corriente y directamente relacionado con su rendimiento en contactos y electrodos eléctricos. Un alto contenido de plata mejora significativamente la conductividad de la aleación. Gracias a su altísima conductividad eléctrica, la plata reduce eficazmente las pérdidas por resistencia como matriz o fase de enlace, lo que la hace adecuada para aplicaciones de alta corriente, como contactos de interruptores automáticos de alta tensión, relés y módulos de radiofrecuencia (RF). La plata humedece las partículas de tungsteno durante el proceso de sinterización en fase líquida para formar una red conductora continua, lo que mejora aún más la eficiencia de transmisión de corriente. A medida que aumenta el contenido de tungsteno, la conductividad disminuye gradualmente. Dado que la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conductividad del tungsteno es mucho menor que la de la plata, el alto contenido de tungsteno reduce la trayectoria conductora y aumenta la resistencia, lo que limita el rendimiento de la aleación en condiciones de alta corriente.

La relación plata-tungsteno también afecta la consistencia conductora de la microestructura. Un contenido de plata demasiado alto puede llevar a una dispersión desigual de partículas de tungsteno y a una conductividad local limitada; un contenido de tungsteno demasiado alto puede formar poros debido a una fase líquida de plata insuficiente, aumentando la resistencia de contacto. La optimización del proceso de sinterización, como la molienda de bolas de alta energía y el prensado isostático en caliente, puede mejorar la uniformidad y densidad de la composición y mejorar la estabilidad conductora. La mejora en la conductividad permite que las aleaciones de plata-tungsteno tengan un buen desempeño en conmutadores de redes inteligentes y dispositivos electrónicos, satisfaciendo las necesidades de baja resistencia y transmisión eficiente. Las direcciones de optimización incluyen la mejora de la red conductora mediante polvo de plata a escala nanométrica o el aumento de la relación de plata en el área conductora mediante un diseño de gradiente funcional. El ajuste razonable de la relación plata-tungsteno proporciona un importante soporte para aplicaciones eléctricas de alta confiabilidad, especialmente en escenarios que requieren una conductividad eficiente.

2.2.4 Efecto de la relación plata-tungsteno en la conductividad térmica de la aleación

plata -tungsteno influye significativamente en la conductividad térmica de la aleación. Esta conductividad es un indicador clave de la capacidad de la aleación para dispersar el calor y está directamente relacionada con su estabilidad y disipación térmica en entornos de alta temperatura. Un alto contenido de plata mejora significativamente la conductividad térmica de la aleación. Gracias a su excelente conductividad térmica, la plata puede transferir calor rápidamente como matriz o fase de unión, evitando la degradación del rendimiento por sobrecalentamiento. Es adecuada para contactos de semiconductores de potencia y aplicaciones de sustratos de disipación térmica electrónica. La red en fase líquida formada por la plata durante el proceso de sinterización promueve una distribución uniforme del calor y mejora la eficiencia de disipación. A medida que aumenta el contenido de tungsteno, la conductividad térmica disminuye gradualmente. Dado que la conductividad térmica del tungsteno es menor que la de la plata, el alto contenido de tungsteno reduce la vía de conducción térmica, lo que limita el rendimiento de la aleación en condiciones de alta carga térmica.

plata -tungsteno también afecta la uniformidad de la conducción térmica. Un contenido de plata demasiado alto puede provocar una expansión térmica desigual y afectar la estabilidad a largo plazo; un contenido de tungsteno demasiado alto puede formar puntos de resistencia térmica debido a una fase líquida de plata insuficiente, lo que reduce la conductividad térmica. La optimización de los procesos de sinterización, como la sinterización por plasma de chispa (SPS) y el tratamiento de superficies, puede reducir la porosidad y los defectos, y mejorar la consistencia de la conductividad térmica. La mejora de la conductividad térmica permite que las aleaciones de plata-tungsteno tengan un buen rendimiento en equipos electrónicos de alta temperatura y componentes aeroespaciales, satisfaciendo las necesidades de disipación térmica eficiente y gestión térmica. Las direcciones de optimización incluyen la optimización

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la red de conducción térmica mediante polvo de plata a escala nanométrica o el uso de recubrimientos compuestos para mejorar las capacidades de disipación térmica de la superficie. El ajuste de la relación plata-tungsteno debe equilibrar la conductividad térmica y la resistencia a altas temperaturas según los requisitos de la aplicación, como el aumento de la relación plata-tungsteno en el sustrato de disipación térmica y el aumento de la relación tungsteno en la estructura de alta temperatura.

2.2.5 Efecto de la relación plata-tungsteno en la densidad de la aleación

La proporción de plata a tungsteno tiene un efecto significativo en la densidad de la aleación, que es un indicador clave de su masa por unidad de volumen y está directamente relacionada con su rendimiento en aplicaciones de contrapeso y blindaje. Con un mayor contenido de plata, la aleación presenta una densidad moderada, inferior a la del tungsteno, pero superior a la de muchos otros metales, lo que la hace adecuada para aplicaciones de contacto eléctrico que requieren cierto peso, pero no excesivo. Sin embargo, un contenido de plata demasiado alto puede reducir la densidad general y limitar su rendimiento en entornos con alto contrapeso. A medida que aumenta el contenido de tungsteno, la densidad de la aleación aumenta significativamente, y debido a su altísima densidad, mejora la capacidad de contrapeso y blindaje contra la radiación, lo que la hace adecuada para contrapesos aeroespaciales y componentes de blindaje para radioterapia médica.

plata -tungsteno también afecta la uniformidad de la densidad. Un contenido de plata demasiado alto puede causar una sedimentación desigual de las partículas de tungsteno, lo que afecta la densidad local; un contenido de tungsteno demasiado alto puede formar poros debido a una fase líquida de plata insuficiente, lo que reduce la densidad general. La optimización del proceso de sinterización, como la sinterización en fase líquida y el prensado isostático en caliente, puede mejorar la distribución de la composición y la densidad. El aumento de la densidad permite que las aleaciones de plata-tungsteno tengan un buen rendimiento en aplicaciones que requieren un alto equilibrio de peso o protección contra la radiación, y pueden satisfacer las necesidades de equilibrio dinámico aeroespacial y protección radiológica médica. Las direcciones de optimización incluyen la mejora de la distribución de partículas a través de polvo de tungsteno a escala nanométrica o el aumento de la proporción de tungsteno en el área de equilibrio de peso mediante un diseño de gradiente funcional.

2.2.6 Efecto de la relación plata-tungsteno en la dureza de la aleación

plata -tungsteno influye significativamente en la dureza de la aleación, es decir, en su capacidad para resistir la indentación superficial o el desgaste, y está directamente relacionada con su durabilidad en entornos de tensión mecánica. Cuando el contenido de plata es alto, la dureza de la aleación es baja, ya que la ductilidad y la baja dureza de la plata dificultan la resistencia al desgaste superficial, lo cual resulta adecuado para aplicaciones de contacto eléctrico con bajas cargas dinámicas. La plata actúa como matriz o fase aglutinante, humedeciendo las partículas de tungsteno durante el proceso de sinterización en fase líquida. Si bien mejora la densidad de la estructura, su baja dureza limita el rendimiento de la aleación en condiciones de alto desgaste. A medida que aumenta el contenido de tungsteno, la dureza aumenta significativamente, ya que la alta dureza y el alto punto de fusión del tungsteno confieren a la aleación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

una mayor resistencia a la compresión y al desgaste. Las partículas de tungsteno forman una estructura de esqueleto en la aleación, lo que mejora la resistencia superficial del material; especialmente con un alto contenido de tungsteno, la dureza alcanza un valor máximo, lo cual resulta adecuado para piezas que requieren alta resistencia al desgaste.

La relación plata-tungsteno también afecta la uniformidad de la microestructura. Un contenido de plata demasiado alto puede provocar una dispersión desigual de las partículas de tungsteno y reducir la estabilidad de la dureza; un contenido de tungsteno demasiado alto puede formar poros debido a una fase líquida de plata insuficiente, lo que afecta la uniformidad de las propiedades mecánicas. La optimización de los procesos de sinterización, como la sinterización por plasma por chispa (SPS) o el prensado isostático en caliente (HIP), puede aumentar la densidad, reducir los defectos y mejorar la consistencia de la dureza. El aumento de la dureza permite que las aleaciones de plata-tungsteno tengan un buen rendimiento en electrodos de soldadura por resistencia, piezas pulverizadas con plasma y contrapesos aeroespaciales, y pueden soportar el desgaste mecánico y el impacto superficial. Las direcciones de optimización incluyen la mejora de la distribución de partículas a través de polvo de tungsteno a escala nanométrica o el uso de recubrimientos de endurecimiento de superficies (como TiN) para mejorar aún más la dureza.

2.2.7 Efecto de la relación plata-tungsteno en la resistencia a altas temperaturas de la aleación

La plata-tungsteno influye significativamente en la resistencia a altas temperaturas de la aleación. Esta resistencia se refiere a la capacidad de la aleación para mantener la estabilidad estructural y el rendimiento en entornos de alta temperatura, lo cual está directamente relacionado con su fiabilidad en aplicaciones de alta temperatura. Cuando el contenido de plata es alto, la resistencia a altas temperaturas de la aleación es menor, ya que la plata tiene un punto de fusión bajo y se ablanda o funde fácilmente a altas temperaturas, lo que limita su uso en entornos térmicos extremos. La plata actúa como fase aglutinante para humedecer las partículas de tungsteno durante la sinterización, pero su baja estabilidad térmica puede reducir el rendimiento en operaciones con alta corriente o alta temperatura. Con el aumento del contenido de tungsteno, la resistencia a altas temperaturas mejora significativamente, ya que su alto punto de fusión y estabilidad térmica le confieren una excelente resistencia a la deformación térmica. Cuando el contenido de tungsteno es alto, la aleación puede mantener la integridad estructural durante la soldadura o el arco de alta temperatura, lo que la hace adecuada para piezas que requieren resistencia a altas temperaturas.

La plata-tungsteno también afecta la estabilidad durante los ciclos térmicos. Un contenido demasiado alto de plata puede provocar una expansión térmica desigual y aumentar el riesgo de estrés térmico; un contenido demasiado alto de tungsteno puede formar microfisuras debido a una fase líquida de plata insuficiente, lo que afecta la uniformidad a altas temperaturas. La optimización del proceso de sinterización, como el calentamiento por etapas y el prensado isostático en caliente, puede mejorar la densidad de la microestructura y optimizar la consistencia a alta temperatura. La mejora de la resistencia a altas temperaturas permite que las aleaciones de plata-tungsteno tengan un buen rendimiento en equipos electrónicos de alta temperatura, componentes de toberas de cohetes y contrapesos aeroespaciales, y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pueden satisfacer las necesidades de entornos térmicos extremos. Las direcciones de optimización incluyen la optimización de la distribución del estrés térmico mediante el diseño de gradientes funcionales o el desarrollo de recubrimientos resistentes a altas temperaturas para mejorar la estabilidad de la superficie. El ajuste de la relación plata-tungsteno debe equilibrar la resistencia a altas temperaturas y la conductividad según los requisitos de la aplicación, como aumentar la proporción de tungsteno en estructuras de alta temperatura mientras se mantiene una cantidad moderada de plata en los componentes conductores.

2.2.8 Efecto de la relación plata-tungsteno en la resistencia a la erosión por arco de la aleación

plata -tungsteno influye significativamente en la resistencia a la erosión por arco de la aleación, es decir, en su capacidad para resistir la ablación por arco y la pérdida de material, y está directamente relacionada con su vida útil en contactos eléctricos de alta corriente. Un alto contenido de plata reduce la resistencia a la erosión por arco de la aleación, ya que su bajo punto de fusión y su actividad química facilitan su fusión o ablación bajo la acción del arco, lo cual resulta adecuado para aplicaciones con baja intensidad de arco. La plata actúa como matriz para humedecer las partículas de tungsteno durante el proceso de sinterización, pero puede acelerar la pérdida superficial en entornos de alta corriente. Con un mayor contenido de tungsteno, la resistencia a la erosión por arco mejora significativamente, ya que su alto punto de fusión y su estabilidad química dificultan su fusión u oxidación bajo el arco, lo que prolonga la vida útil de los contactos y electrodos. Con un alto contenido de tungsteno, la aleación puede mantener la integridad superficial en entornos de conmutación frecuente o alta corriente, lo cual resulta adecuado para piezas que requieren alta resistencia al arco.

plata -tungsteno también afecta la uniformidad bajo la acción del arco. Un contenido de plata demasiado alto puede causar que el arco se concentre en la ablación en un área local; un contenido de tungsteno demasiado alto puede formar una estructura no homogénea debido a una fase líquida de plata insuficiente, lo que afecta la consistencia de la resistencia a la corrosión. La optimización del proceso de sinterización, como la sinterización al vacío y el tratamiento de superficies, puede reducir la oxidación y los defectos y mejorar la resistencia a la erosión del arco. La mejora en la resistencia a la erosión del arco permite que las aleaciones de plata-tungsteno tengan un buen rendimiento en contactos de interruptores automáticos de alto voltaje, relés y electrodos de soldadura por resistencia, y pueden satisfacer las necesidades de operaciones frecuentes y de alta corriente. Las direcciones de optimización incluyen la mejora de la uniformidad de la superficie mediante polvo de tungsteno a escala nanométrica o el uso de recubrimientos resistentes al arco (como ZrC) para mejorar aún más la resistencia a la corrosión.

2.3 Análisis del rendimiento de la aleación de plata y tungsteno

El alto rendimiento de la aleación de plata-tungsteno se debe a su microestructura única y a la sinergia de su composición. Su dureza, resistencia a altas temperaturas, resistencia a la erosión por arco y otras características la hacen ideal para diversas aplicaciones exigentes. El análisis del rendimiento de la aleación debe partir del mecanismo microscópico, el diseño del material y los requisitos de la aplicación, y analizar sistemáticamente sus ventajas en cuanto a proceso de formación de dureza, resistencia a altas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperaturas y resistencia a la erosión por arco. Estas características se logran mediante la optimización del proceso de pulvimetalurgia para garantizar la fiabilidad de la aleación en contactos eléctricos, electrodos de soldadura y componentes aeroespaciales.

2.3.1 Mecanismo de formación y ventajas de la alta dureza de la aleación de plata y tungsteno

La alta dureza de la aleación de plata-tungsteno es su principal ventaja en entornos de alto desgaste y tensión mecánica, lo que le permite resistir la indentación superficial, el desgaste y el impacto, y prolongar la vida útil de los componentes. La formación de dureza proviene de la alta dureza inherente del tungsteno y la microoptimización de la estructura compuesta de plata-tungsteno durante el proceso de sinterización. La plata, como fase aglutinante, humedece las partículas de tungsteno en la sinterización en fase líquida, mejorando la densidad de la estructura, mientras que el tungsteno, como fase de refuerzo, proporciona un soporte de esqueleto de alta dureza. Este efecto sinérgico permite que la aleación de plata-tungsteno tenga un buen rendimiento en electrodos de soldadura por resistencia, componentes pulverizados con plasma y contrapesos aeroespaciales, capaces de soportar el desgaste mecánico y el daño superficial. La ventaja de la alta dureza es que mejora la capacidad de la aleación para resistir la deformación, especialmente en entornos de alta corriente o alta temperatura, la superficie de la aleación puede mantener la integridad y evitar la degradación del rendimiento.

2.3.1.1 Mecanismo microestructural de alta dureza

El mecanismo de formación de la alta dureza de la aleación de plata-tungsteno depende principalmente del diseño único de su microestructura y de la interacción durante la sinterización. Este proceso se lleva a cabo mediante pulvimetalurgia, que incluye etapas como la mezcla de polvos, el prensado, la sinterización en fase líquida y el posprocesamiento. La clave del mecanismo microestructural reside en la distribución de las partículas de tungsteno en la matriz de plata, el efecto humectante de la sinterización en fase líquida y el efecto sinérgico del reforzamiento de los límites de grano. En primer lugar, el tungsteno es una fase de refuerzo de alta dureza. Sus partículas se dispersan uniformemente mediante tecnología de molienda de bolas de alta energía durante la etapa de mezcla de polvos. La optimización del tamaño y la forma de las partículas garantiza la formación de una estructura de esqueleto uniforme después del prensado. El alto punto de fusión del tungsteno lo mantiene en estado sólido durante la sinterización y no es fácil de deformar ni fundir. Proporciona un soporte rígido para la aleación y mejora significativamente la dureza de la base. La plata, como fase de unión de bajo punto de fusión, se funde para formar un líquido durante la sinterización en fase líquida, humedece las partículas de tungsteno y rellena sus huecos. Este proceso se logra mediante capilaridad y difusión, eliminando los microporos y mejorando la densidad de la aleación.

El efecto humectante de la sinterización en fase líquida es clave para la formación de alta dureza. La fase líquida de plata penetra los defectos microscópicos en la superficie de las partículas de tungsteno a alta temperatura, mejora la fuerza de unión entre las partículas y forma una estructura de interfaz densa. Esta unión no solo mejora la resistencia general del material, sino que también mejora la dureza mediante el efecto de refuerzo del límite de grano. Este refuerzo del límite de grano se origina en la capa de fase de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

plata entre las partículas de tungsteno. La ductilidad de la plata amortigua la concentración de tensiones hasta cierto punto, pero la alta dureza del tungsteno domina la resistencia superficial de la aleación. Durante el proceso de sinterización, la aplicación de la tecnología de prensado isostático en caliente (HIP) o sinterización por plasma de chispa (SPS) optimiza aún más la microestructura, elimina los poros residuales mediante alto voltaje y corriente de pulso, comprime los límites de grano, hace que las partículas de tungsteno se distribuyan más estrechamente y mejora significativamente el nivel de dureza. Además, la geometría y la orientación de las partículas de tungsteno también influyen en la formación de la dureza. Las partículas de tungsteno regulares o poliédricas pueden dispersar la tensión de manera más efectiva y mejorar la resistencia a la compresión y al desgaste.

La uniformidad de la microestructura es una garantía importante para la formación de una alta dureza. Cuando el contenido de plata es moderado, la fase líquida es suficiente para rellenar los huecos entre las partículas de tungsteno, evitando poros causados por una fase líquida insuficiente o una sedimentación irregular de partículas causada por un exceso de fase líquida. El control de la atmósfera de sinterización previene la oxidación o la introducción de impurezas, mantiene la pureza del tungsteno y la plata, y asegura la estabilidad de la microestructura. La aplicación de polvo de tungsteno a escala nanométrica mejora aún más el mecanismo de dureza, aumenta la densidad del límite de grano al reducir el tamaño de partícula y mejora la capacidad del límite de grano para bloquear el movimiento de dislocaciones, mejorando así significativamente la resistencia a la deformación de la aleación. La fracción de volumen de partículas de tungsteno en la microestructura también tiene un impacto directo en la dureza. Cuanto mayor sea el contenido de tungsteno, más evidente será el efecto de mejora de la dureza, pero el efecto humectante de la plata debe equilibrarse para evitar una mayor fragilidad.

El mecanismo microestructural formado por la alta dureza proporciona a la aleación de plata-tungsteno numerosas ventajas. En primer lugar, la alta dureza permite que la aleación resista el desgaste mecánico y la indentación superficial, lo que la hace especialmente adecuada para aplicaciones de alto desgaste, como electrodos de soldadura por resistencia y piezas pulverizadas con plasma, y permite mantener la integridad superficial durante el contacto mecánico frecuente. En segundo lugar, la alta dureza mejora la capacidad de la aleación para resistir la deformación en entornos de alta temperatura. El alto punto de fusión del tungsteno y el efecto de densificación de la plata reducen la probabilidad de que la aleación se ablande o funda durante la soldadura por arco o a alta temperatura, lo que prolonga su vida útil. Además, la microestructura de alta dureza facilita el procesamiento de piezas con formas complejas, y la alta precisión en los contactos y la fabricación de electrodos se logra mediante tecnología de mecanizado de precisión. La microestructura optimizada también mejora la resistencia a la fatiga de la aleación y reduce el riesgo de microfisuras causadas por ciclos térmicos o choques mecánicos, lo que la hace especialmente adecuada para contrapesos aeroespaciales y componentes de conexión eléctrica de defensa.

Sin embargo, la formación de alta dureza también conlleva ciertos desafíos. Un contenido excesivo de tungsteno puede aumentar la fragilidad de la aleación, especialmente cuando la fase líquida de plata es insuficiente, lo que aumenta el riesgo de microfisuras. El control preciso del proceso de sinterización y el postratamiento (como el recubrimiento de endurecimiento superficial) se convierten en la clave para resolver este problema. Las direcciones de optimización incluyen el desarrollo de estructuras

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nanocompuestas para mejorar el equilibrio entre tenacidad y dureza, o el aumento del contenido de tungsteno en la superficie mediante un diseño de gradiente funcional para mejorar la dureza local. En resumen, el mecanismo microestructural de la alta dureza de la aleación de plata-tungsteno le otorga una excelente resistencia al desgaste y a la deformación mediante el efecto sinérgico del soporte rígido de tungsteno, la humectación y densificación de la plata, y el fortalecimiento del límite de grano, sentando una base sólida para su amplia aplicación en los campos eléctrico, electrónico y de defensa.

2.3.1.2 Ventajas de la alta dureza en aplicaciones resistentes al desgaste

La alta dureza de la aleación de plata-tungsteno ofrece importantes ventajas en aplicaciones resistentes al desgaste, lo que la convierte en un material ideal para entornos de alto desgaste. La resistencia al desgaste es la capacidad de una aleación para resistir el desgaste superficial, la abrasión y el daño mecánico, lo que afecta directamente su vida útil en aplicaciones de contacto frecuente o cargas elevadas. La alta dureza de la aleación de plata-tungsteno se debe principalmente a la alta dureza inherente del tungsteno. Las partículas de tungsteno forman una estructura sólida durante el proceso de sinterización, lo que mejora significativamente la resistencia de la superficie de la aleación al desgaste mecánico. La plata, como fase aglutinante, humedece las partículas de tungsteno mediante sinterización en fase líquida, rellena los huecos microscópicos, forma una microestructura densa y mejora aún más la durabilidad de la superficie. Esta alta dureza permite que la aleación de plata-tungsteno resista el contacto mecánico, la fricción y el impacto de alta frecuencia, especialmente en situaciones que requieren un funcionamiento estable a largo plazo.

En aplicaciones específicas con resistencia al desgaste, la alta dureza de la aleación de plata-tungsteno le confiere un excelente rendimiento en electrodos de soldadura por resistencia. Los electrodos de soldadura entran en contacto frecuente con piezas de trabajo en condiciones de alta corriente y temperatura. Los materiales tradicionales, como la plata pura o las aleaciones a base de cobre, son propensos al desgaste superficial debido a su baja dureza, lo que provoca la deformación del electrodo y el deterioro de la calidad de la soldadura. La alta dureza de la aleación de plata-tungsteno le permite resistir el desgaste mecánico en la superficie del electrodo, mantener una geometría de contacto precisa y garantizar la estabilidad y consistencia del proceso de soldadura. De igual manera, en piezas pulverizadas con plasma, la alta dureza permite que la aleación resista el impacto y la abrasión del flujo de partículas a alta velocidad, prolonga la vida útil de las piezas y es adecuada para aplicaciones de recubrimiento en la industria aeroespacial y de recubrimientos industriales. Además, en componentes de contrapeso aeroespaciales, la alta dureza mejora la resistencia de la aleación al desgaste bajo vibración y cargas mecánicas, garantizando la fiabilidad a largo plazo del sistema de equilibrado dinámico.

La ventaja de la aplicación de alta dureza también se refleja en la reducción de costos de mantenimiento y la mejora de la eficiencia del equipo. La resistencia al desgaste de la aleación de plata-tungsteno reduce la frecuencia de reemplazo de componentes, especialmente en contactos de interruptores de circuito de alta tensión y contactos de relé. El contacto mecánico frecuente y los arcos eléctricos a menudo conducen a la pérdida de superficie. La alta dureza ralentiza eficazmente esta pérdida y extiende el ciclo de operación del equipo. La optimización de la microestructura de la aleación, como la eliminación de poros

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a través del prensado isostático en caliente (HIP) o la mejora de la uniformidad de partículas a través de polvo de tungsteno a escala nanométrica, mejora aún más la resistencia al desgaste. Esta característica respalda la estabilidad a largo plazo de la aleación en entornos de alto desgaste y reduce la degradación del rendimiento o los riesgos de seguridad causados por el desgaste. Las direcciones de optimización incluyen el desarrollo de recubrimientos de endurecimiento de superficies (como TiN o CrN) para mejorar aún más la resistencia al desgaste, o el aumento del contenido de tungsteno en el área resistente al desgaste a través del diseño de gradiente funcional para mejorar el rendimiento local.

La ventaja de la alta dureza en cuanto a resistencia al desgaste también conlleva ciertos desafíos. Un alto contenido de tungsteno puede aumentar la fragilidad de la aleación, especialmente cuando la fase líquida de plata es insuficiente, lo que aumenta el riesgo de microfisuras y afecta la consistencia de la resistencia al desgaste. El control preciso y el posprocesamiento del proceso de sinterización son clave, como el uso de la sinterización por plasma de chispa (SPS) para formar rápidamente una estructura densa o la reducción de los puntos de concentración de tensiones mediante el pulido de superficies. En el futuro, la combinación de tecnología de monitoreo inteligente para evaluar el estado de desgaste en tiempo real o la exploración de recubrimientos autorreparadores para reparar dinámicamente los daños superficiales mejorarán aún más el potencial de aplicación de la aleación de plata-tungsteno en entornos de resistencia al desgaste.

2.3.1.3 Comparación de dureza con otras aleaciones y ventajas

La alta dureza de la aleación de plata-tungsteno está estrechamente relacionada con su rendimiento en entornos de alto desgaste y tensión mecánica. Sus ventajas se destacan al comparar su dureza con la de otras aleaciones comunes. La dureza es la capacidad de un material para resistir la indentación o el desgaste superficial. La dureza de la aleación de plata-tungsteno se debe principalmente a la alta dureza inherente del tungsteno y a su densa microestructura formada durante el proceso de sinterización. A continuación, se compararán con materiales como la aleación de tungsteno-cobre, la plata pura y el carburo cementado para analizar las ventajas de la aleación de plata-tungsteno en cuanto a dureza y su excelente rendimiento en diversas aplicaciones.

En primer lugar, en comparación con la aleación de tungsteno-cobre, la aleación de plata-tungsteno presenta una mayor dureza. Esta aleación utiliza tungsteno como matriz y cobre como fase de unión. Si bien posee buena conductividad térmica y buenas propiedades de procesamiento, la menor dureza del cobre limita su resistencia al desgaste y es adecuada para sustratos de disipación de calor en lugar de contactos de alto desgaste. La aleación de plata-tungsteno tiene un mayor contenido de tungsteno y forma una estructura densa debido al efecto humectante de la plata. Su dureza es significativamente mejor que la de la aleación de tungsteno-cobre. Especialmente en electrodos de soldadura por resistencia y piezas pulverizadas con plasma, la aleación de plata-tungsteno puede resistir un mayor desgaste mecánico e impacto superficial. Además, la ventaja de la dureza de la aleación de plata-tungsteno también se refleja en su estabilidad en entornos resistentes al arco eléctrico. El alto punto de fusión del tungsteno le permite mantener la integridad de la superficie bajo la erosión del arco, mientras que la fase de cobre de la aleación de tungsteno-cobre se funde fácilmente, lo que limita su resistencia al desgaste por arco eléctrico.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En segundo lugar, en comparación con la plata pura, la aleación de plata-tungsteno presenta una dureza considerablemente mayor. Si bien la plata pura se usa ampliamente en contactos eléctricos por su alta conductividad y ductilidad, su menor dureza la hace susceptible a deformaciones o ablaciones por desgaste mecánico y arcos eléctricos, lo que limita su vida útil. Al incorporar partículas de tungsteno de alta dureza, la aleación de plata-tungsteno mejora significativamente su resistencia al desgaste y a la deformación, lo que la hace ideal para entornos que requieren contacto frecuente, como contactos de interruptores automáticos de alta tensión y contactos de relés. La blandura de la plata pura dificulta la resistencia a cargas elevadas, mientras que su alta dureza garantiza la fiabilidad a largo plazo de los componentes en entornos dinámicos. Si bien su conductividad es ligeramente inferior a la de la plata pura, se puede lograr un rendimiento equilibrado optimizando la relación plata-tungsteno.

En tercer lugar, en comparación con el carburo cementado (como la aleación de tungsteno-cobalto), la aleación de plata-tungsteno tiene una dureza ligeramente inferior, pero su rendimiento integral es más ventajoso. El carburo cementado se compone principalmente de carburo de tungsteno y cobalto, con una dureza extremadamente alta. Se utiliza ampliamente en herramientas de corte y moldes, pero su conductividad eléctrica y térmica son bajas, lo que limita su aplicación en contactos eléctricos. Aunque la dureza de la aleación de plata-tungsteno es inferior a la del carburo cementado, su excelente conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión por arco la hacen más práctica en contactos eléctricos y electrodos de soldadura. La optimización microestructural de la aleación de plata-tungsteno (como el polvo de tungsteno a nanoescala y la sinterización en fase líquida) hace que su dureza se acerque al nivel del carburo cementado, al tiempo que conserva las propiedades conductoras de la plata, logrando una combinación efectiva de dureza y conductividad.

La ventaja de la dureza de la aleación de plata-tungsteno se destaca en su diversidad de aplicaciones. En electrodos de soldadura por resistencia, su alta dureza resiste el desgaste durante el contacto con la pieza, garantizando una soldadura estable; en componentes pulverizados por plasma, soporta el impacto del flujo de partículas a alta velocidad y prolonga su vida útil; en contrapesos aeroespaciales, mejora la durabilidad en entornos con vibración. Estas ventajas la hacen superior a otras aleaciones en entornos donde se deben considerar tanto la dureza como la conductividad. Las líneas de optimización incluyen la mejora del equilibrio entre dureza y tenacidad mediante estructuras nanocompuestas o el desarrollo de recubrimientos de endurecimiento superficial para mejorar aún más la resistencia al desgaste. La ventaja comparativa de la aleación de plata-tungsteno por su alta dureza le otorga una posición única en los sectores eléctrico, electrónico y de defensa, lo que supone un importante apoyo para componentes de alta fiabilidad. Su potencial se podrá aprovechar aún más en el futuro mediante la tecnología de fabricación inteligente.

2.3.2 Principio y rendimiento de la resistencia a la erosión por arco de la aleación de plata y tungsteno

La resistencia a la erosión por arco de la aleación de plata-tungsteno es su propiedad fundamental en contactos eléctricos de alta corriente, lo que le permite resistir la erosión por arco y la pérdida de material, prolongando así la vida útil de los componentes. La resistencia a la erosión por arco se refiere a la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

capacidad de una aleación para resistir la fusión, la evaporación y la oxidación superficial bajo la acción de un arco, lo cual está directamente relacionado con su fiabilidad en interruptores automáticos, relés y electrodos de soldadura de alta tensión. Esta resistencia se beneficia del alto punto de fusión y la estabilidad química del tungsteno, así como de la optimización microscópica de la estructura compuesta de plata-tungsteno.

El principio de la resistencia a la erosión por arco se basa principalmente en las propiedades físicas y químicas del tungsteno. El tungsteno tiene un punto de fusión extremadamente alto, lo que dificulta su fusión o evaporación bajo la alta temperatura del arco. El calor generado por el arco es absorbido y dispersado principalmente por las partículas de tungsteno, lo que reduce la pérdida a gran escala de la superficie del material. La plata, como fase aglutinante, humedece las partículas de tungsteno durante la sinterización en fase líquida para formar una microestructura densa que mejora la resistencia al agrietamiento y al desprendimiento de la aleación. Al aplicar el arco, la fase de plata puede fundirse localmente, pero la estructura de esqueleto de las partículas de tungsteno proporciona un soporte estable, limita la pérdida de plata fundida y mantiene la integridad geométrica de la superficie. Además, la estabilidad química del tungsteno reduce la tendencia a la oxidación y la corrosión en el entorno del arco, lo que reduce la degradación superficial causada por este. La optimización del proceso de sinterización, como la protección al vacío o con gas inerte, previene la introducción de impurezas oxidativas y mejora aún más la resistencia a la erosión por arco.

En términos de rendimiento en aplicaciones reales, la resistencia a la erosión por arco de la aleación de plata-tungsteno es particularmente prominente en los contactos de interruptores automáticos de alta tensión. Estos interruptores generan arcos eléctricos fuertes al interrumpir corrientes altas. Los materiales tradicionales, como la plata pura o las aleaciones a base de cobre, son propensos a fallar por fusión o ablación, lo que acorta la vida útil de los contactos. La aleación de plata-tungsteno mejora su resistencia al arco eléctrico gracias a su alto contenido de tungsteno. Las partículas de tungsteno forman una capa protectora bajo la acción del arco, reduciendo la pérdida de la fase de plata y asegurando que los contactos mantengan un rendimiento estable durante las operaciones de conmutación frecuentes. En electrodos de soldadura por resistencia, la resistencia a la erosión por arco de la aleación de plata-tungsteno le permite soportar el impacto del arco durante la soldadura, mantener la planitud de la superficie del electrodo y garantizar la calidad y consistencia de la soldadura. En componentes pulverizados con plasma, la resistencia al arco de la aleación facilita el funcionamiento a largo plazo en entornos de plasma de alta temperatura, reduce la pérdida de material superficial y prolonga la vida útil de los componentes.

La resistencia a la erosión por arco también se refleja en la reducción de los efectos secundarios causados por los arcos. La optimización microestructural de las aleaciones de plata-tungsteno (como el prensado isostático en caliente para eliminar poros) reduce el riesgo de ablación por arco concentrado y la aparición de microfisuras y salpicaduras de material fundido. Las propiedades no magnéticas de la aleación evitan la influencia de las interferencias electromagnéticas en la estabilidad del arco y mejoran su aplicabilidad en entornos sensibles a las interferencias electromagnéticas (como equipos de resonancia magnética o sistemas de radar). Sin embargo, un contenido excesivo de plata puede reducir la resistencia a la erosión por arco, ya que esta tiene un punto de fusión bajo y se funde fácilmente bajo el arco. Esto debe mejorarse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aumentando la proporción de tungsteno o un recubrimiento superficial (como ZrC). Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de polvo de tungsteno a nanoescala para mejorar la uniformidad de la superficie o el uso de tecnología de monitorización inteligente para evaluar el estado de la pérdida de arco en tiempo real. En resumen, el principio y el rendimiento de la resistencia a la erosión por arco de la aleación de plata-tungsteno la convierten en una pieza clave en aplicaciones eléctricas de alta corriente, ofreciendo una sólida garantía para componentes de alta fiabilidad, y la investigación futura puede mejorar aún más su durabilidad.

2.3.2.1 Mecanismo de erosión por arco

El mecanismo de erosión por arco es la base para comprender la resistencia al arco de las aleaciones de plata-tungsteno, que implica la influencia de los procesos físicos y químicos del arco en la superficie del material. La erosión por arco se produce cuando se desconecta o se cierra una corriente alta, y el arco se forma en el espacio de contacto como un plasma de alta temperatura (generalmente con una temperatura superior a 6000 °C), lo que produce fuertes efectos térmicos y reacciones químicas. El efecto térmico del arco provoca fusión local, evaporación y pulverización catódica en la superficie del material. El metal fundido se calienta rápidamente y se expulsa bajo la acción del arco, lo que provoca pérdida de material. La alta temperatura del arco también desencadena reacciones de oxidación, especialmente en un entorno de aire, donde la superficie del metal se combina con el oxígeno para formar óxidos, acelerando aún más la erosión. La concentración de energía del arco provoca una alta tensión térmica en áreas locales, lo que puede causar microfisuras o desprendimiento, especialmente cuando la dureza o densidad del material es insuficiente.

Los mecanismos específicos de la erosión por arco incluyen la conducción de calor, la gasificación y las reacciones electroquímicas. La conducción de calor transfiere la energía del arco al interior del material, lo que provoca un rápido calentamiento de las capas superficiales y subsuperficiales. Los materiales con puntos de fusión bajos (como la plata) tienden a fundirse en poco tiempo. El proceso de gasificación provoca la evaporación del metal fundido a altas temperaturas, especialmente a altas densidades de corriente, donde la velocidad de evaporación aumenta significativamente, lo que resulta en una pérdida de masa del material. Las reacciones electroquímicas ocurren en el plasma del arco, donde el metal se combina con el oxígeno o el nitrógeno del entorno para formar óxidos o nitruros, que pueden adherirse a la superficie o desprenderse, lo que agrava aún más la erosión. La acción continua del arco también puede causar concentración de tensión térmica, especialmente en la interfaz de materiales heterogéneos o defectos microscópicos, lo que aumenta el riesgo de propagación de grietas. La fase de plata en la aleación de plata y tungsteno es susceptible a los efectos térmicos debido a su punto de fusión más bajo (961 °C), mientras que la fase de tungsteno es relativamente estable debido a su alto punto de fusión (3422 °C), pero la calidad de unión de su interfaz afecta directamente la resistencia general a la corrosión. El mecanismo de erosión por arco también se ve afectado por la compleja influencia de las condiciones de uso. La energía del arco en un entorno de alta presión es mayor y la tasa de erosión es más rápida; la oxidación puede ralentizarse en un entorno de baja presión debido a la menor concentración de oxígeno, pero el efecto térmico sigue siendo dominante. La duración del arco y la magnitud de la corriente también afectan el grado de erosión. Una corriente alta a corto plazo puede causar fusión instantánea, y una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corriente baja a largo plazo puede causar oxidación lenta y desgaste. La microestructura de la aleación de plata-tungsteno (como la porosidad y la distribución de partículas) es crucial para la sensibilidad a la erosión por arco. La porosidad o la distribución desigual pueden convertirse en un punto de concentración de tensión térmica, acelerando la pérdida de material. Comprender estos mecanismos de erosión por arco proporciona una base teórica para optimizar la resistencia a la corrosión de la aleación de plata-tungsteno. Su durabilidad se puede mejorar eficazmente ajustando la proporción de la composición y el proceso de sinterización.

2.3.2.2 El principio intrínseco de la aleación de plata y tungsteno que resiste la erosión por arco

El principio inherente de la resistencia a la erosión por arco de la aleación de plata-tungsteno reside en el diseño único de su composición y la optimización de su microestructura, junto con el alto punto de fusión y la estabilidad química del tungsteno, y el efecto humectante y densificador de la plata. La clave para resistir la erosión por arco reside en reducir la fusión, la evaporación y la oxidación de los materiales bajo plasma de alta temperatura. La aleación de plata-tungsteno logra este objetivo mediante los siguientes mecanismos. En primer lugar, el alto punto de fusión del tungsteno (3422 °C) es el factor clave para resistir la erosión por arco. Bajo la alta temperatura del arco, las partículas de tungsteno permanecen sólidas, absorben y dispersan el calor y limitan el rango de fusión superficial. La estabilidad química del tungsteno reduce aún más la tendencia a la oxidación, y no reacciona fácilmente con el oxígeno ni el nitrógeno en el plasma de arco, lo que reduce la pérdida de formación de óxido. La plata se funde como fase aglutinante en la sinterización en fase líquida humedece las partículas de tungsteno y rellena los huecos microscópicos para formar una microestructura densa. Esta estructura mejora la resistencia de la aleación al agrietamiento y al pelado, y evita daños causados por la tensión térmica del arco.

El diseño microestructural de la aleación de plata-tungsteno desempeña un papel importante en la resistencia a la erosión por arco. Durante el proceso de sinterización, la fase líquida de plata penetra en la superficie de las partículas de tungsteno, lo que mejora la fuerza de unión interfacial entre ellas y reduce la propagación de microfisuras bajo la acción del arco. La distribución uniforme de las partículas de tungsteno forma una estructura protectora que dispersa la energía del arco y reduce el riesgo de fusión o evaporación local. El proceso de prensado isostático en caliente (HIP) o sinterización por plasma de chispa (SPS) optimiza aún más la microestructura, elimina los poros residuales, comprime los límites de grano y aumenta la resistencia a la corrosión de la superficie de la aleación. La fase de plata puede fundirse localmente bajo la acción del arco, pero el soporte de la estructura de tungsteno limita la pérdida de plata fundida y mantiene la integridad geométrica de la superficie. Este efecto sinérgico permite que la aleación de plata-tungsteno presente una excelente resistencia al arco cuando se desconecta o se cierra la alta corriente.

La proporción de la composición de la aleación también influye directamente en el principio inherente de resistencia a la erosión por arco. Un alto contenido de tungsteno mejora la resistencia de la aleación a la fusión y la oxidación, lo que la hace adecuada para aplicaciones con alta intensidad de arco, como los contactos de interruptores automáticos de alta tensión. Si bien el contenido de plata es moderado, la fase líquida es suficiente para humedecer las partículas de tungsteno y asegurar su densidad, un contenido de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

plata demasiado alto puede reducir la resistencia a la corrosión, ya que su bajo punto de fusión facilita su fusión bajo el arco. El control de la atmósfera de sinterización (como el vacío o argón de alta pureza) previene la introducción de impurezas oxidativas, mantiene la pureza del tungsteno y la plata, y mejora aún más la resistencia a la corrosión. Las tecnologías de tratamiento de superficies, como los recubrimientos antioxidantes aplicados mediante deposición química en fase de vapor asistida por plasma (PECVD), también contribuyen a la aplicación del principio inherente y reducen los daños secundarios causados por el arco.

El principio inherente de la aleación de plata-tungsteno en la resistencia a la erosión del arco le permite un buen desempeño en aplicaciones prácticas. En los contactos de interruptores automáticos de alta tensión, la resistencia al arco de la aleación extiende la vida útil del interruptor; en electrodos de soldadura por resistencia, la resistencia a la erosión del arco mantiene la planitud de la superficie del electrodo; y en componentes pulverizados con plasma, la resistencia a la corrosión de la aleación soporta el funcionamiento a largo plazo en entornos de plasma de alta temperatura. Las direcciones de optimización incluyen la mejora de la uniformidad de la superficie mediante polvo de tungsteno a escala nanométrica o el desarrollo de recubrimientos autorreparadores para reparar dinámicamente el daño del arco. En resumen, la aleación de plata-tungsteno logra una eficiente resistencia a la erosión del arco gracias al alto punto de fusión del tungsteno, el efecto de densificación de la plata y la optimización microestructural, proporcionando una base sólida para aplicaciones eléctricas de alta fiabilidad.

2.3.2.3 Diferencias en el rendimiento de resistencia a la erosión por arco en diferentes entornos de uso

La resistencia a la erosión por arco de la aleación de plata-tungsteno varía significativamente en diferentes entornos de uso, lo cual se ve afectado por factores como las condiciones ambientales, las características de la corriente y la frecuencia de uso. La evaluación de la resistencia a la erosión por arco debe combinarse con escenarios de aplicación específicos, como interruptores automáticos de alta tensión, electrodos de soldadura y componentes aeroespaciales, para analizar el efecto de la erosión del entorno en la superficie de la aleación y sus diferencias de rendimiento. Estas diferencias proporcionan una base importante para optimizar el diseño y la selección de aleaciones.

En los contactos de interruptores automáticos de alta tensión, la resistencia a la erosión por arco de la aleación de plata-tungsteno es excepcional en entornos de alta corriente y alta tensión. Cuando el interruptor automático interrumpe una corriente elevada (normalmente miles de amperios), se genera un arco eléctrico potente, con temperaturas que pueden alcanzar los 6000 °C o superiores. El alto contenido de tungsteno de la aleación de plata-tungsteno le permite resistir la fusión y la evaporación. Las partículas de tungsteno absorben el calor y dispersan la energía del arco, reduciendo la pérdida superficial. Sin embargo, el oxígeno del aire puede inducir una ligera oxidación de la fase de plata, y el funcionamiento prolongado puede aumentar la rugosidad de la superficie y afectar la conductividad. Un entorno protegido al vacío o con gas inerte (como los interruptores automáticos SF6) puede mejorar significativamente la resistencia a la erosión por arco, reducir la oxidación y la pulverización catódica, y prolongar la vida útil de los contactos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En electrodos de soldadura por resistencia, la resistencia a la erosión por arco de la aleación de plata-tungsteno ofrece un buen rendimiento en entornos de pulsos de alta corriente a corto plazo. El proceso de soldadura implica una alta densidad de corriente (decenas de miles de amperios por milímetro cuadrado) y altas temperaturas locales, con un tiempo de acción del arco corto pero una energía concentrada. La estructura de esqueleto de tungsteno de la aleación de plata-tungsteno resiste la fusión instantánea, y el efecto humectante de la fase de plata mantiene la densidad de la superficie, asegurando que el electrodo mantenga la estabilidad de la forma durante múltiples ciclos de soldadura. Sin embargo, el vapor metálico o la escoria de soldadura en el entorno de soldadura pueden adherirse a la superficie, aumentando el riesgo de erosión, por lo que se requiere una limpieza regular o un recubrimiento antiadherente para mantener el rendimiento. En escenarios de soldadura a alta temperatura, la limitación del punto de fusión de la plata puede causar reblandecimiento local, por lo que es necesario optimizar la resistencia térmica aumentando la proporción de tungsteno.

En componentes aeroespaciales, como los electrodos de pulverización de plasma, la resistencia a la erosión por arco de la aleación de plata-tungsteno ofrece un buen rendimiento en entornos de plasma continuo de alta temperatura. La pulverización de plasma implica un flujo de iones a alta velocidad y la acción del arco, y la alta dureza y el alto punto de fusión de la fase de tungsteno de la aleación le permiten soportar choques térmicos prolongados y abrasión superficial. La alta estabilidad química del tungsteno reduce las pérdidas por oxidación, y la conductividad térmica de la plata ayuda a dispersar el calor. Sin embargo, la exposición prolongada al oxígeno o a gases corrosivos puede provocar la formación de una fina capa de óxido sobre la superficie del tungsteno, lo que reduce ligeramente su resistencia a la erosión. Optimizar los procesos de sinterización y los recubrimientos superficiales (como el ZrC) puede mejorar significativamente el rendimiento en entornos extremos.

Factores ambientales como la humedad, la niebla salina y los agentes de limpieza químicos también afectan la resistencia a la erosión por arco. En un ambiente húmedo, la fase de plata puede sufrir una ligera corrosión, lo que aumenta el riesgo de oxidación inducida por arco; en un entorno marino o industrial, la niebla salina puede acelerar la degradación de la superficie, y se requieren recubrimientos resistentes a la corrosión (como TiN) para mejorar la protección. En un entorno de baja presión o vacío, el efecto de la oxidación se debilita y la resistencia a la erosión por arco es mejor, pero el efecto térmico sigue siendo dominante, y se debe prestar atención a la concentración de tensión térmica. La frecuencia de uso y el tamaño de la corriente también juegan un papel clave. La conmutación de alta frecuencia puede acelerar la corrosión y la baja corriente puede causar una oxidación lenta. La relación plata-tungsteno debe ajustarse según el escenario específico. La diferencia en la resistencia a la erosión por arco de la aleación de plata-tungsteno en diferentes entornos de uso proporciona una guía para el diseño de materiales. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de recubrimientos adaptables al entorno o la evaluación del estado de la erosión en tiempo real mediante tecnología de monitorización inteligente.

2.3.2.4 Formas de mejorar la resistencia a la erosión por arco

Mejorar la resistencia a la erosión por arco de la aleación de plata-tungsteno es fundamental para garantizar su fiabilidad a largo plazo en aplicaciones eléctricas de alta corriente. Esto se logra mediante

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la combinación del diseño de materiales, la optimización del proceso de preparación y el tratamiento superficial. Esta mejora aborda principalmente problemas como la fusión a alta temperatura, la oxidación y la concentración de tensiones térmicas, y combina el alto punto de fusión del tungsteno con las ventajas conductoras de la plata para optimizar la microestructura y el entorno de uso. A continuación, se presentan métodos específicos para mejorarla.

En primer lugar, optimizar la proporción de la composición es fundamental para mejorar la resistencia a la erosión por arco. Aumentar el contenido de tungsteno puede mejorar significativamente la resistencia de la aleación a la fusión y la oxidación, ya que su alto punto de fusión (3422 °C) la mantiene estable a altas temperaturas de arco y reduce la pérdida de superficie. Diversos estudios han demostrado que, con un contenido de tungsteno del 60 % al 80 %, la resistencia a la erosión por arco de la aleación alcanza el equilibrio óptimo, considerando el efecto protector del tungsteno y la conductividad de la plata. Los aditivos traza, como el níquel o el cobalto (0,5 %-2 %), pueden mejorar el efecto de sinterización en fase líquida, mejorar la unión interfacial entre las partículas de tungsteno y reducir el riesgo de microfisuras inducidas por arco. Sin embargo, es necesario controlar estrictamente el uso de aditivos para evitar afectar las propiedades no magnéticas.

En segundo lugar, la optimización del proceso de sinterización puede mejorar significativamente la densidad de la microestructura. La sinterización en fase líquida rellena los huecos entre las partículas de tungsteno mediante el efecto humectante de la plata, reduce la porosidad y mejora la capacidad antidesgaste. La tecnología de sinterización por plasma de chispa (SPS) forma rápidamente una estructura densa mediante corriente pulsada y alto voltaje, acorta el tiempo de sinterización, inhibe el crecimiento excesivo de grano y mejora la uniformidad de la superficie. El prensado isostático en caliente (HIP) elimina los defectos residuales mediante alta presión omnidireccional, mejora aún más la densidad y reduce los puntos de concentración de energía del arco. El entorno de sinterización al vacío o con argón de alta pureza puede prevenir la introducción de impurezas oxidadas, mantener la pureza del tungsteno y la plata, y reducir las pérdidas por oxidación inducidas por el arco.

En tercer lugar, la tecnología de tratamiento de superficies es un método eficaz para mejorar la resistencia a la erosión por arco. Los recubrimientos antioxidantes aplicados mediante deposición química en fase de vapor mejorada con plasma (PECVD), como el nitrato de titanio (TiN) o el carburo de circonio (ZrC), pueden formar una densa capa protectora sobre la superficie de la aleación, aislando el oxígeno y el plasma del arco, reduciendo así la fusión y la oxidación. El pulido electroquímico puede optimizar el acabado superficial y reducir el punto inicial de ablación concentrada por arco. Los recubrimientos de endurecimiento superficial también pueden mejorar la resistencia al desgaste y prolongar la vida útil de los contactos. Estudios han demostrado que los recubrimientos de TiN pueden reducir las tasas de erosión por arco entre un 30 % y un 40 %, mejorando significativamente el rendimiento.

En cuarto lugar, la gestión ambiental y la optimización de las condiciones de uso pueden mejorar aún más la resistencia a la erosión por arco. En interruptores automáticos de alta tensión, se utiliza SF₆ o gas inerte como agente extintor de arco para reducir la concentración de oxígeno y las reacciones de oxidación. En electrodos de soldadura, el control de parámetros como el ancho y la frecuencia del pulso

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de corriente puede reducir la duración del arco y los efectos térmicos. La tecnología de monitorización inteligente detecta la pérdida de arco y los cambios de temperatura en tiempo real mediante sensores integrados, optimiza los ciclos de mantenimiento y previene la erosión excesiva. El diseño de material funcionalmente graduado (FGM) aumenta el contenido de tungsteno en la superficie para mejorar la resistencia a la fusión, conservando al mismo tiempo la conductividad de la fase interna de plata.

La aplicación combinada de estos enfoques permite que las aleaciones de plata-tungsteno tengan un buen rendimiento en contactos de interruptores de alta tensión, electrodos de soldadura por resistencia y componentes pulverizados con plasma, lo que prolonga la vida útil de los componentes y mejora su fiabilidad. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de recubrimientos autorreparadores para reparar dinámicamente los daños por arco eléctrico o la mejora de la uniformidad de la superficie mediante polvos de tungsteno a escala nanométrica.

2.3.3 Capacidades antiadherentes y antisoldantes de la aleación de plata y tungsteno

Las propiedades de la aleación de plata-tungsteno para la soldadura antiadherente y antifusión son importantes en los contactos eléctricos y electrodos de soldadura, ya que le permiten resistir la adhesión y la fusión con la pieza de trabajo o la superficie de contacto, manteniendo así la independencia y la estabilidad funcional de los componentes. La antiadherencia se refiere a la capacidad de la aleación para evitar que los materiales se adhieran entre sí bajo contacto mecánico o acción de arco, mientras que la soldadura antifusión se refiere a la capacidad de evitar la fusión con la pieza de trabajo bajo condiciones de soldadura o arco a alta temperatura. Estas características afectan directamente el rendimiento de conmutación de contactos, la calidad de la soldadura y la vida útil del equipo. La aleación de plata-tungsteno logra un excelente rendimiento gracias a la alta dureza del tungsteno y la optimización de la humectación de la plata.

2.3.3.1 Causas de adherencia y soldadura

Los fenómenos de adhesión y soldadura son los principales desafíos que enfrentan las aleaciones de plata-tungsteno en aplicaciones de alta corriente o alta temperatura. Las causas de la adhesión y la soldadura se relacionan con las propiedades físicas y químicas del material, las condiciones de contacto y los factores ambientales. La adhesión se refiere a la adhesión superficial del contacto o electrodo a la pieza de trabajo o al material dual bajo contacto mecánico o acción de arco, mientras que la soldadura se refiere a la fusión parcial del material y la pieza de trabajo a alta temperatura para formar una conexión irreversible. La ocurrencia de estos fenómenos reduce directamente el rendimiento de conmutación y la vida útil de los componentes, y sus causas requieren un análisis exhaustivo.

Las principales causas de adhesión son la soldadura en frío microscópica y los efectos del calor por fricción entre las superficies de contacto. En los contactos de interruptores automáticos de alta tensión o los contactos de relés, la aleación de plata-tungsteno contacta el material dual bajo alta presión, y las microprotuberancias superficiales sufren deformación plástica debido a la fuerza mecánica, acortando la distancia entre los átomos metálicos al rango de coincidencia de red, lo que resulta en un efecto de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

soldadura en frío. Bajo la acción del arco, la alta temperatura local (superior a 6000 °C) funde la fase de plata, mejora la fluidez y se adhiere a la superficie del material dual, especialmente cuando el contenido de plata es alto, aumenta el riesgo de adhesión. El efecto del calor por fricción exagera aún más la adhesión en el contacto dinámico, especialmente en escenarios de conmutación de alta frecuencia o deslizamiento a baja velocidad, donde la acumulación de calor promueve la difusión atómica superficial.

La ocurrencia de la soldadura por fusión está estrechamente relacionada con la soldadura a alta temperatura o las condiciones de arco. En electrodos de soldadura por resistencia o piezas pulverizadas con plasma, la alta densidad de corriente causa fusión local, y la superficie de la aleación de plata-tungsteno y el material de la pieza de trabajo (como acero o aluminio) forman un baño fundido a alta temperatura. El bajo punto de fusión de la plata facilita su fusión y, tras mezclarse con el metal de la pieza de trabajo, se enfría y solidifica para formar una soldadura por fusión. Si bien el alto punto de fusión del tungsteno proporciona cierta resistencia, la tensión térmica o las impurezas (como los óxidos) en la interfaz pueden promover la fusión. La actividad química del plasma del arco también influye. El oxígeno o el nitrógeno reaccionan con el metal fundido para formar compuestos, aumentar la viscosidad y promover la soldadura por fusión.

La influencia de los factores ambientales en la adhesión y los fenómenos de soldadura es crucial. En entornos húmedos o con azufre, la fase de plata puede formar sulfuros u óxidos, lo que reduce la capacidad antiadherente de la superficie y aumenta el riesgo de adhesión. En entornos con alta temperatura o con alto contenido de oxígeno, la plata fundida reacciona con el óxido de la pieza, lo que aumenta la tendencia a la soldadura. La presión de contacto, la magnitud de la corriente y la frecuencia de conmutación también son factores clave. El funcionamiento a alta tensión o alta frecuencia intensifica los efectos térmicos y la difusión atómica, acelerando la adhesión y la soldadura. Los defectos microestructurales, como los poros o la distribución irregular, pueden convertirse en puntos de concentración de tensiones, lo que favorece estos fenómenos.

Las causas de adhesión y soldadura ofrecen una guía para optimizar las aleaciones de plata-tungsteno. Los materiales tradicionales, como la plata pura, son propensos a la adhesión debido a su alta ductilidad, y las aleaciones a base de cobre son propensas a la soldadura debido a sus bajos puntos de fusión. Las aleaciones de plata-tungsteno intentan superar estos problemas optimizando la dureza del tungsteno y la proporción de plata. Las directrices de optimización incluyen ajustar la proporción plata-tungsteno, mejorar el tratamiento superficial y controlar las condiciones de uso para reducir el riesgo de adhesión y soldadura. Comprender estos mecanismos ayudará a diseñar aleaciones de plata-tungsteno con mayor resistencia a la adhesión y la soldadura, lo que proporcionará un soporte fiable para la aplicación de contactos eléctricos y electrodos de soldadura.

2.3.3.2 Rendimiento antiadherente de la aleación de plata y tungsteno

La propiedad antiadherente de la aleación de plata-tungsteno es excepcional en aplicaciones de contacto eléctrico y electrodos de soldadura, lo que le permite resistir eficazmente la adhesión superficial con la pieza de trabajo o el material de acoplamiento, manteniendo la independencia y la estabilidad de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conmutación de los componentes. La antiadherencia se refiere a la capacidad de la aleación para evitar que los materiales se adhieran entre sí bajo contacto mecánico o acción de arco, lo que afecta directamente el rendimiento de apertura y cierre, así como la vida útil del contacto. La aleación de plata-tungsteno exhibe excelentes propiedades antiadherentes gracias a la alta dureza del tungsteno, la optimización de la humectación de la plata y el efecto sinérgico de su microestructura, especialmente en interruptores automáticos de alta tensión, relés y electrodos de soldadura por resistencia.

En los contactos de interruptores automáticos de alta tensión, la capacidad antiadherente de la aleación de plata-tungsteno es especialmente evidente al desconectar o cerrar una corriente elevada. Cuando los contactos interrumpen corrientes elevadas (normalmente de miles de amperios), se generan arcos eléctricos, y las altas temperaturas pueden provocar que materiales tradicionales como la plata pura o las aleaciones de cobre se adhieran al material dual, lo que afecta a la fiabilidad de la conmutación. El alto contenido de tungsteno (60-80 %) de la aleación de plata-tungsteno proporciona una estructura de esqueleto resistente que resiste la deformación plástica superficial y los efectos de la soldadura en frío, mientras que el efecto humectante adecuado de la fase de plata forma una interfaz densa, reduciendo el punto inicial de adhesión. Pruebas reales demuestran que, tras millones de ciclos de conmutación, la tasa de adhesión de los contactos de aleación de plata-tungsteno es inferior al 5 %, muy superior al 20-30 % de los contactos de plata pura, lo que prolonga significativamente la vida útil del equipo.

En los electrodos de soldadura por resistencia, las propiedades antiadherentes de la aleación de plata-tungsteno son excelentes en contacto frecuente con piezas de trabajo (como acero o aluminio). Durante la soldadura, la alta densidad de corriente y la alta temperatura local pueden provocar que el electrodo se adhiera a la pieza. Los materiales tradicionales, como las aleaciones de cobre, son propensos a fallar debido a la adhesión del metal fundido. Las partículas de tungsteno de la aleación de plata-tungsteno forman una capa protectora sobre la superficie. La dureza (generalmente de hasta 200-300 HV) evita la incrustación de materiales en la pieza de trabajo, y la conductividad térmica de la plata dispersa rápidamente el calor y reduce el riesgo de adherencia. En aplicaciones reales, tras miles de soldaduras continuas, el área de adhesión superficial de los electrodos de plata-tungsteno es inferior al 1%, lo que mantiene la estabilidad de la forma del electrodo y la calidad de la soldadura.

En piezas pulverizadas con plasma, las propiedades antiadherentes de la aleación de plata-tungsteno favorecen la separación entre el flujo iónico de alta velocidad y la pieza de trabajo. Durante el proceso de pulverización, la alta temperatura del arco y el impacto de partículas pueden provocar la adhesión del material y afectar la uniformidad del recubrimiento. La alta dureza y el bajo coeficiente de expansión térmica de la aleación de plata-tungsteno reducen la adhesión causada por la tensión térmica, y la estabilidad química del tungsteno reduce aún más la posibilidad de reacción con la pieza de trabajo. Los datos experimentales muestran que, tras un funcionamiento prolongado, la adhesión de los electrodos pulverizados con aleación de plata-tungsteno se reduce aproximadamente un 50 % en comparación con los materiales a base de cobre, lo que garantiza la fiabilidad del proceso de recubrimiento.

El excelente rendimiento antiadherente también se beneficia de la optimización de la microestructura. Procesos de sinterización como el prensado isostático en caliente (HIP) eliminan la porosidad, y la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sinterización por plasma de chispa (SPS) mejora la uniformidad de las partículas, reduce los puntos de concentración de tensiones y la probabilidad de adhesión. Tratamientos superficiales como el pulido electroquímico o recubrimientos antiadherentes (como DLC) mejoran aún más la capacidad antiadherente, especialmente en entornos húmedos o con contenido de azufre. El recubrimiento aísla la reacción entre la fase de plata y el entorno y mantiene la superficie limpia. Sin embargo, un contenido excesivo de plata puede aumentar el riesgo de adhesión, que debe compensarse aumentando la proporción de tungsteno u optimizando el tratamiento superficial. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de polvo de tungsteno a escala nanométrica para aumentar la dureza superficial o la integración de tecnología de monitorización inteligente para evaluar el estado de adhesión en tiempo real. En resumen, el rendimiento antiadherente de la aleación de plata-tungsteno proporciona un importante respaldo para su uso en aplicaciones de conmutación y soldadura de alta frecuencia, mejorando significativamente la fiabilidad y la vida útil de los componentes.

2.3.3.3 Análisis de los factores que afectan las capacidades antiadherentes y antisoldantes

La capacidad antiadherente y antisoldante de la aleación de plata-tungsteno se ve afectada por numerosos factores, como las propiedades del material, el proceso de preparación, las condiciones de uso y los parámetros ambientales, que determinan directamente su rendimiento en contactos eléctricos y electrodos de soldadura. El análisis de estos factores influyentes ayuda a optimizar el diseño de la aleación y a mejorar su fiabilidad en entornos de alta corriente y alto desgaste.

En primer lugar, la proporción de la composición es el factor principal que afecta la capacidad de resistir la adhesión y la soldadura. Cuanto mayor sea el contenido de tungsteno, más dura y resistente a altas temperaturas será la aleación, y mejor será la capacidad de resistir la adhesión y la soldadura, ya que el alto punto de fusión del tungsteno (3422 °C) reduce el riesgo de fusión de la superficie, y la dureza (200-300 HV) previene la soldadura en frío y la incrustación de la pieza de trabajo. Cuando el contenido de plata es moderado, la sinterización en fase líquida forma una estructura densa y mejora la unión interfacial, pero un contenido excesivo de plata (más del 50 %) puede aumentar la tendencia a la adhesión y la soldadura debido a su bajo punto de fusión (961 °C), especialmente a altas temperaturas de arco. Los aditivos traza como el níquel (0,5 %-2 %) pueden mejorar la tenacidad y los efectos de humectación, pero las cantidades excesivas pueden introducir magnetismo o reducir la resistencia a la corrosión, y requieren un control preciso.

En segundo lugar, la microestructura tiene un impacto significativo en la capacidad de resistir la adhesión y la soldadura. La densidad es clave, y una porosidad alta (por ejemplo, superior al 5%) puede convertirse en un punto de concentración de tensiones, aumentando el riesgo de adhesión o soldadura. Los procesos de sinterización, como el prensado isostático en caliente (HIP) o la sinterización por plasma de chispa (SPS), mejoran la densidad al eliminar poros y reducir los defectos superficiales bajo efectos térmicos. La distribución uniforme y la optimización del tamaño de partícula de las partículas de tungsteno (escala nanométrica o submicrónica) mejoran la resistencia a la deformación de la estructura del esqueleto y reducen la tendencia a la soldadura en frío. La capa de fase de plata, reforzada por el límite de grano, amortigua la tensión térmica; sin embargo, la distribución desigual puede provocar fusión local, por lo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que se requiere molienda de bolas de alta energía para garantizar la uniformidad del polvo mezclado.

En tercer lugar, las propiedades de la superficie afectan directamente el rendimiento antiadherente y antisoldadura. Una rugosidad superficial elevada aumenta el área de contacto, lo que puede provocar fácilmente la adhesión por soldadura en frío o metal fundido. El pulido electroquímico o mecánico puede reducir la rugosidad y los puntos iniciales de adhesión. Los recubrimientos antiadherentes, como el nitruro de titanio (TiN) o los recubrimientos tipo diamante (DLC), forman una capa protectora que aísla la fase de plata de la reacción con la pieza de trabajo y reduce el riesgo de soldadura. La oxidación o sulfuración de la superficie (por ejemplo, en un entorno con azufre) puede aumentar la viscosidad, por lo que la pureza de la superficie debe controlarse mediante sinterización al vacío o atmósfera inerte.

En cuarto lugar, las condiciones de contacto son factores clave que afectan el rendimiento. Una presión de contacto elevada agrava la deformación plástica y aumenta el riesgo de soldadura en frío, por lo que es necesario optimizar el diseño del contacto para reducir la sobretensión. La magnitud de la corriente y la frecuencia de conmutación también influyen. Una corriente elevada (como miles de amperios) o una operación a alta frecuencia (varias veces por segundo) exacerban los efectos térmicos y la difusión atómica, acelerando la adhesión y la soldadura. La corriente pulsada de corta duración (como la soldadura) puede reducir el rango de fusión, pero los parámetros deben controlarse con precisión.

En quinto lugar, los factores ambientales tienen un impacto significativo en la capacidad de resistir la adhesión y la soldadura. Un entorno húmedo o con azufre (como una atmósfera industrial) puede causar sulfuración u oxidación de la fase de plata, aumentar la viscosidad y requerir un diseño sellado o un recubrimiento anticorrosivo. Un entorno de alta temperatura (por ejemplo, superior a 300 °C) intensifica la tendencia a la fusión, lo que requiere un aumento en la proporción de tungsteno o el uso de protección con gas inerte. Las altas concentraciones de oxígeno (como el 21 % en el aire) promueven la soldadura por oxidación, y un entorno de vacío o SF₆ puede reducir significativamente la corrosión. La pulverización de sal o los limpiadores químicos pueden corroer la superficie, afectando la estabilidad antiadherente, lo que requiere un mantenimiento regular o la pasivación de la superficie.

La influencia combinada de estos factores proporciona una dirección para optimizar las aleaciones de plata-tungsteno. Las estrategias de optimización incluyen el ajuste de la proporción de plata-tungsteno (60%-80% tungsteno), la optimización del proceso de sinterización (como HIP), la aplicación de recubrimientos antiadherentes (como DLC) y el control de las condiciones de uso (como entornos con bajo contenido de oxígeno). En el futuro, la combinación de tecnología de monitorización inteligente para evaluar el estado de adhesión y soldadura en tiempo real, o el desarrollo de recubrimientos adaptativos para ajustar dinámicamente el rendimiento, mejorará aún más las capacidades antiadherentes y antisoldantes de las aleaciones de plata-tungsteno y facilitará aplicaciones de alta fiabilidad.

2.3.4 Principio y aplicación de la excelente conductividad de la aleación de plata y tungsteno

La excelente conductividad de la aleación de plata-tungsteno es la base de su amplia aplicación en equipos eléctricos, lo que le permite transmitir corriente eficientemente y satisfacer las necesidades de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contactos y electrodos de alto rendimiento. La conductividad se refiere a la capacidad de un material para transferir carga. La aleación de plata-tungsteno logra un excelente rendimiento de transmisión de corriente gracias a la alta conductividad de la plata y al soporte estructural del tungsteno. Esta característica no solo depende de las propiedades inherentes del material, sino que también está estrechamente relacionada con la optimización de la proporción de composición y la microestructura, lo que proporciona un soporte fiable para escenarios como interruptores automáticos de alta tensión, relés y electrodos de soldadura. A continuación, se analizará en detalle la naturaleza física de la conductividad y el mecanismo conductor de la aleación de plata-tungsteno, la variación de la conductividad con diferentes proporciones de composición y las ventajas de las aplicaciones conductoras en equipos eléctricos.

2.3.4.1 Naturaleza física de la conductividad y mecanismo conductor de la aleación de plata y tungsteno

La esencia física de la conductividad reside en la movilidad de los electrones libres en el material. Los metales desprenden fácilmente sus electrones externos en su estructura atómica para formar portadores de carga móviles. El mecanismo conductor de la aleación de plata y tungsteno se basa en la alta conductividad de la plata y su función en la aleación, combinada con la estabilidad estructural y la microoptimización del tungsteno. Como metal precioso, la plata posee abundantes electrones libres que pueden moverse rápidamente bajo la acción de un campo eléctrico, lo que le confiere una excelente eficiencia de transmisión de corriente. Si bien el tungsteno presenta baja conductividad, su alto punto de fusión y sus elevadas propiedades de dureza forman una sólida estructura de esqueleto durante el proceso de sinterización, lo que favorece la distribución continua de la fase de plata y garantiza la estabilidad de la trayectoria de la corriente.

El mecanismo conductor de la aleación de plata y tungsteno se logra mediante un proceso de pulvimetalurgia. Durante el proceso de sinterización en fase líquida, la plata funde y humedece las partículas de tungsteno para formar una red conductora continua, permitiendo que los electrones se muevan eficientemente en la fase de plata. Si bien las partículas de tungsteno, como fase de refuerzo, no contribuyen directamente a la conductividad, reducen los puntos de concentración de resistencia mediante una distribución uniforme y mejoran la consistencia conductora general. La optimización del proceso de sinterización, como la molienda de bolas de alta energía y el prensado isostático en caliente, mejora aún más la densidad de la microestructura y reduce los obstáculos a la transmisión de corriente causados por poros y defectos. La ductilidad de la plata también le permite adaptarse a tensiones microscópicas, mantener la integridad de la red conductora y mantener su rendimiento incluso bajo contacto mecánico o arco eléctrico.

Las propiedades no magnéticas de la aleación también refuerzan el mecanismo conductor, evitando la influencia de interferencias electromagnéticas en la trayectoria de la corriente. Este mecanismo conductor permite que la aleación de plata-tungsteno tenga un buen rendimiento en entornos de alta corriente. La alta conductividad de la plata constituye la base, y el soporte estructural del tungsteno garantiza la estabilidad a largo plazo. La uniformidad de la microestructura y la continuidad de la fase

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de plata son fundamentales.

Cualquier distribución irregular o una fase líquida de plata insuficiente puede aumentar la resistencia y reducir la eficiencia de la conducción. Las líneas de optimización incluyen la mejora de la red conductora mediante polvo de plata a escala nanométrica o el aumento del contenido de plata en la zona conductora mediante un diseño de gradiente funcional. En resumen, el mecanismo conductor de la aleación de plata y tungsteno logra una transmisión eficiente de la corriente mediante el movimiento libre de electrones de la plata y el soporte estructural del tungsteno, sentando las bases para su aplicación en el campo eléctrico.

2.3.4.2 Cambios en la conductividad en diferentes proporciones de componentes

La conductividad de la aleación de plata-tungsteno muestra una regularidad significativa con el cambio de la proporción de componentes. La proporción de plata a tungsteno afecta directamente la eficiencia del movimiento de electrones y las características de resistencia. Este patrón de cambio proporciona una guía para optimizar el diseño de la aleación según los requisitos de la aplicación. Cuando el contenido de plata es alto, la conductividad de la aleación mejora significativamente, ya que la alta conductividad de la plata es el factor dominante, y los electrones pueden moverse libremente en la fase de plata, reduciendo la pérdida de resistencia. La plata, como matriz o fase de enlace, forma una red continua durante el proceso de sinterización. La eficiencia de transmisión de corriente aumenta con el aumento de la proporción de plata, lo que resulta especialmente adecuado para aplicaciones de contacto y electrodos que requieren alta conductividad.

A medida que aumenta el contenido de tungsteno, la conductividad disminuye gradualmente, ya que la conductividad del tungsteno es mucho menor que la de la plata. Su alta dureza y punto de fusión elevado mejoran la estabilidad estructural, pero aumentan la resistencia. Un alto contenido de tungsteno puede limitar la continuidad de la fase de plata y dificultar el movimiento de electrones, lo que resulta en una conductividad reducida. El equilibrio entre la plata y el tungsteno es clave. Un contenido demasiado alto de tungsteno puede causar una fase líquida de plata insuficiente, lo que resulta en poros microscópicos o una distribución desigual, aumentando aún más la resistencia. Por el contrario, si bien un contenido demasiado alto de plata mejora la conductividad, puede debilitar la resistencia al desgaste y a las altas temperaturas de la aleación, afectando su rendimiento general.

También debe considerarse el efecto del proceso de sinterización en la proporción de componentes. El efecto humectante de la plata en la sinterización en fase líquida aumenta con su proporción, lo que mejora la conectividad de la red conductora, pero si las partículas de tungsteno se distribuyen de forma desigual, la conductividad local puede disminuir. Optimizar la mezcla de polvos y los parámetros de sinterización, como el uso de materias primas de alta pureza y una atmósfera inerte, puede reducir la interferencia de impurezas y garantizar la estabilidad de la conductividad. En aplicaciones prácticas, cuando el contenido de plata está dentro de un cierto rango (como una proporción más alta), la conductividad muestra una tendencia de aumento lineal, mientras que cuando el contenido de tungsteno es dominante, la conductividad tiende a ser estable. Esta regla muestra que la optimización de la conductividad de las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aleaciones de plata y tungsteno necesita encontrar un equilibrio entre los requisitos de conductividad y las propiedades mecánicas. Por ejemplo, los contactos de los interruptores automáticos de alto voltaje tienden a tener una alta proporción de plata, mientras que los electrodos de soldadura aumentan moderadamente el contenido de tungsteno.

Esta ley de cambio proporciona flexibilidad al diseño de materiales. Las direcciones de optimización incluyen el aumento de la densidad de la red conductora mediante polvo de plata a escala nanométrica o la concentración de la fase de plata en la zona conductora mediante un diseño de gradiente funcional. El cambio de conductividad con diferentes proporciones de componentes también se ve afectado por la microestructura, y la densidad y la uniformidad de las partículas garantizan el mantenimiento de una alta conductividad. En resumen, la conductividad de la aleación de plata-tungsteno muestra una tendencia de fortalecimiento a debilitamiento con el cambio de la proporción plata-tungsteno. Un ajuste razonable de la proporción permite alcanzar un rendimiento óptimo en aplicaciones eléctricas.

2.3.4.3 Ventajas de las aplicaciones conductoras en equipos eléctricos

La ventaja de la aleación de plata-tungsteno en su conductividad en equipos eléctricos la convierte en la opción ideal para interruptores automáticos de alta tensión, relés, electrodos de soldadura por resistencia y módulos de radiofrecuencia. Esta ventaja se debe a la alta conductividad de la plata, combinada con el soporte estructural del tungsteno, lo que proporciona una transmisión de corriente eficiente y estabilidad a largo plazo. La aleación de plata-tungsteno puede mantener una baja resistencia en entornos de alta corriente, reducir la pérdida de energía y garantizar la fiabilidad y eficiencia del funcionamiento del equipo, lo que la hace especialmente adecuada para situaciones que requieren conmutaciones frecuentes o cargas elevadas.

En los contactos de interruptores de alta tensión, la ventaja conductiva de la aleación de plata-tungsteno se manifiesta en una eficiente capacidad de transmisión de corriente. Al interrumpir una corriente alta, el contacto debe establecer y cortar rápidamente el paso de la corriente. La alta conductividad de la plata garantiza características de baja resistencia, reduce los efectos térmicos y la energía del arco, y la estructura de soporte de tungsteno mantiene la estabilidad geométrica del contacto. Esta combinación permite que el contacto mantenga un rendimiento constante durante múltiples operaciones de conmutación, prolongando la vida útil del equipo y reduciendo los costes de mantenimiento. En comparación con materiales tradicionales como la plata pura, aunque la conductividad de la aleación de plata-tungsteno es ligeramente menor, su resistencia al desgaste y a la resistencia al arco compensan esta deficiencia. En relés y módulos de RF, la ventaja conductiva de la aleación de plata-tungsteno facilita la transmisión de señales de alta frecuencia y un funcionamiento con bajas pérdidas. Los relés deben responder rápidamente a los cambios de corriente. La red conductora de la aleación de plata-tungsteno garantiza la integridad de la señal, mientras que sus propiedades no magnéticas evitan las interferencias electromagnéticas, lo que la hace especialmente adecuada para entornos sensibles a los campos electromagnéticos. Los módulos de RF utilizan rutas de baja resistencia para transmitir señales de alta frecuencia. La excelente conductividad de la aleación de plata y tungsteno satisface esta necesidad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En los electrodos de soldadura por resistencia, la ventaja conductiva de la aleación de plata-tungsteno garantiza una concentración eficiente de la corriente. El proceso de soldadura requiere que el electrodo transfiera rápidamente una gran cantidad de corriente a la pieza de trabajo. La alta conductividad de la plata reduce el calor por resistencia, y la dureza del tungsteno mantiene la estabilidad de la forma del electrodo. Esta característica hace que el proceso de soldadura sea más uniforme, reduce los defectos y mejora la calidad de la soldadura. En comparación con los electrodos a base de cobre, la aleación de plata-tungsteno tiene una conductividad ligeramente inferior, pero su resistencia al desgaste y al arco eléctrico proporciona una mayor vida útil. La ventaja de la aleación de plata-tungsteno en aplicaciones conductivas también se refleja en su adaptabilidad. Al ajustar la proporción plata-tungsteno y optimizar la microestructura, la aleación logra un equilibrio entre las propiedades conductivas y mecánicas en diferentes dispositivos eléctricos. El tratamiento superficial, como el pulido o el recubrimiento, mejora aún más la estabilidad conductiva y reduce el impacto de la oxidación superficial en la transmisión de corriente. Las líneas de optimización incluyen la mejora de la red conductora mediante polvo de plata a escala nanométrica o la integración de tecnología de monitoreo inteligente para optimizar la trayectoria de la corriente en tiempo real.

2.3.5 Características y valor de la buena conductividad térmica de la aleación de plata-tungsteno

La buena conductividad térmica de la aleación de plata-tungsteno es una característica importante en aplicaciones de alta temperatura y alta potencia, ya que le permite transferir calor eficientemente y mantener la estabilidad y el rendimiento de los componentes. La conductividad térmica se refiere a la capacidad de un material para transferir calor. La aleación de plata-tungsteno logra excelentes capacidades de gestión térmica gracias a la alta conductividad térmica de la plata y al soporte estructural del tungsteno. Esta característica no solo depende de las propiedades inherentes del material, sino que también está estrechamente relacionada con la optimización de su microestructura y relación de composición, lo que proporciona un soporte clave para sustratos de disipación de calor electrónicos y componentes aeroespaciales.

2.3.5.1 Principios básicos de la conductividad térmica y mecanismo de conductividad térmica de la aleación de plata y tungsteno

El principio básico de la conductividad térmica es que el calor dentro del material se transfiere mediante electrones libres y vibraciones reticulares. Los metales poseen una alta conductividad térmica debido a su abundancia de electrones libres. El mecanismo de conductividad térmica de la aleación de plata y tungsteno se basa en la excelente conductividad térmica de la plata y su papel dominante en la aleación, junto con la estabilidad estructural y la microoptimización del tungsteno. Como metal precioso, la plata posee una alta densidad de electrones libres que le permiten transferir rápidamente energía térmica, lo que le otorga a la aleación una gestión térmica eficiente. Si bien el tungsteno posee una baja conductividad térmica, su alto punto de fusión y su alta dureza forman un esqueleto resistente durante el proceso de sinterización, lo que favorece la distribución continua de la fase de plata y garantiza la estabilidad de la transferencia de calor. El mecanismo de conductividad térmica de la aleación de plata y tungsteno se logra mediante un proceso de pulvimetalurgia. Durante el proceso de sinterización en fase

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

líquida, la plata funde y humedece las partículas de tungsteno para formar una red termoconductora continua, lo que permite una eficiente transferencia de calor en la fase de plata. Si bien las partículas de tungsteno, como fase de refuerzo, no contribuyen directamente a la conductividad térmica, reducen los puntos de concentración de resistencia térmica mediante una distribución uniforme y mejoran la consistencia general de la conductividad térmica. La optimización del proceso de sinterización, como la molienda de bolas de alta energía y el prensado isostático en caliente, mejora aún más la densidad de la microestructura y reduce los obstáculos a la transferencia de calor causados por poros y defectos. La ductilidad de la plata también le permite adaptarse a las microtensiones, mantener la integridad de la red termoconductora y mantener su rendimiento incluso en condiciones de ciclos térmicos.

El bajo coeficiente de expansión térmica de la aleación también refuerza el mecanismo de conductividad térmica, reduciendo el impacto de la tensión térmica en la estructura y garantizando la estabilidad durante el funcionamiento a largo plazo. Este mecanismo de conductividad térmica permite que la aleación de plata-tungsteno tenga un buen rendimiento en entornos con alta carga térmica. La alta conductividad térmica de la plata proporciona la base, y el soporte estructural del tungsteno garantiza su durabilidad a largo plazo. La uniformidad de la microestructura y la continuidad de la fase de plata son clave. Cualquier distribución desigual o una fase líquida de plata insuficiente puede aumentar la resistencia térmica y reducir la eficiencia de la conductividad térmica. Las líneas de optimización incluyen la mejora de la red de conductividad térmica mediante polvo de plata a escala nanométrica o el aumento del contenido de plata en el área conductora térmica mediante un diseño de gradiente funcional. En resumen, el mecanismo de conductividad térmica de la aleación de plata-tungsteno logra una gestión térmica eficiente mediante la transferencia de calor de electrones libres de la plata y el soporte estructural del tungsteno, sentando las bases para su rendimiento en aplicaciones de alta temperatura.

2.3.5.2 Relación entre la conductividad térmica y el efecto de disipación del calor

Existe una estrecha correlación entre la conductividad térmica de la aleación de plata-tungsteno y su capacidad de disipación térmica. Esta capacidad se refiere a la capacidad del material para transferir calor desde puntos calientes locales al entorno circundante, lo que afecta el control de la temperatura y la vida útil de los componentes. La alta conductividad térmica de la aleación de plata-tungsteno le permite transferir rápidamente el calor del área caliente, evitando la degradación del rendimiento o fallos causados por sobrecalentamiento local. Esta relación entre la conductividad térmica y la disipación térmica depende de la alta conductividad térmica de la plata y la estabilidad estructural del tungsteno, y la optimización de la microestructura la mejora aún más.

La alta conductividad térmica de la plata es la base del efecto de disipación de calor. El calor se transfiere eficientemente en la fase de plata a través de electrones libres, lo que reduce la acumulación de temperaturas de punto caliente. Aunque el tungsteno, como fase de refuerzo, tiene baja conductividad térmica, su distribución uniforme forma una ruta de transferencia de calor estable para evitar que el calor se retenga en áreas específicas. La microestructura densa formada durante el proceso de sinterización reduce la resistencia térmica y puede conducir el calor suavemente desde el interior a la superficie, mejorando la eficiencia de disipación de calor. El efecto humectante de la plata llena los espacios entre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

las partículas de tungsteno durante la sinterización en fase líquida, mejorando la continuidad de la conducción de calor y, por lo tanto, mejorando el efecto de disipación de calor. La uniformidad de la microestructura es la clave. La porosidad o la distribución desigual pueden conducir a la concentración de calor y debilitar la capacidad de disipación de calor.

El excelente rendimiento de la disipación térmica mejora directamente la fiabilidad de la aplicación de la aleación de plata y tungsteno. En sustratos de disipación térmica electrónica, la conductividad térmica transfiere rápidamente el calor generado por los dispositivos de potencia para evitar el sobrecalentamiento y los daños en los chips, prolongando así la vida útil del equipo. En electrodos de soldadura, el efecto de disipación térmica reduce la acumulación de calor del arco, mantiene la estabilidad de la superficie del electrodo y la calidad de la soldadura. En componentes aeroespaciales, la conductividad térmica facilita la gestión térmica en entornos de alta temperatura y garantiza la integridad estructural. La correlación entre la conductividad térmica y la disipación térmica también está limitada por las condiciones de uso. Una mayor área de disipación térmica o unas buenas condiciones ambientales de intercambio térmico pueden mejorar aún más el efecto. El tratamiento superficial, como el pulido o el recubrimiento, también puede optimizar la disipación térmica. Las líneas de optimización incluyen el aumento de la densidad de la red térmica mediante polvo de plata a escala nanométrica o la concentración de la fase de plata en la zona de disipación térmica mediante un diseño de gradiente funcional. La mejora de la conductividad térmica se traduce directamente en una mejor disipación térmica, lo que reduce el daño a los componentes causado por el estrés térmico y ofrece compatibilidad con aplicaciones de alta temperatura y alta potencia.

2.3.5.3 Valor de aplicación de la conductividad térmica en entornos de trabajo de alta temperatura

La conductividad térmica de la aleación de plata-tungsteno en entornos de trabajo de alta temperatura la convierte en un material clave en equipos electrónicos, sistemas de soldadura y componentes aeroespaciales. Estos entornos de trabajo exigen una gestión térmica rigurosa de los materiales. La aleación de plata-tungsteno transfiere eficazmente el calor gracias a su buena conductividad térmica, manteniendo así la estabilidad y la funcionalidad de los componentes. Este valor aplicativo se refleja no solo en la rápida disipación del calor, sino también en su estabilidad estructural y durabilidad, que cumplen con los altos requisitos de fiabilidad en condiciones de alta temperatura.

En dispositivos electrónicos, la conductividad térmica de la aleación de plata-tungsteno se refleja en la mejora del rendimiento de los dispositivos de potencia y los sustratos de disipación de calor. Los componentes electrónicos generan mucho calor durante su funcionamiento, y los materiales tradicionales de disipación de calor pueden fallar por sobrecalentamiento debido a una conductividad térmica insuficiente. La alta conductividad térmica de la aleación de plata-tungsteno transfiere rápidamente el calor del chip al disipador de calor para evitar la degradación o daños en el rendimiento, y su estabilidad estructural garantiza la fiabilidad durante el funcionamiento a largo plazo. En comparación con otros materiales, la ventaja de la conductividad térmica de la aleación de plata-tungsteno, junto con su resistencia al desgaste, le confiere un excelente rendimiento en dispositivos electrónicos de alta densidad y prolonga su vida útil.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En los sistemas de soldadura, la conductividad térmica de la aleación de plata-tungsteno se refleja en el funcionamiento estable de los electrodos y cabezales de soldadura. El proceso de soldadura implica altas temperaturas y la acción del arco, y la acumulación de calor puede provocar la deformación o fusión del electrodo. La conductividad térmica de la aleación de plata-tungsteno dispersa eficazmente el calor y mantiene la integridad de la superficie del electrodo. Su alta dureza resiste aún más el desgaste y garantiza la estabilidad de la calidad de la soldadura. Esta característica convierte a la aleación de plata-tungsteno en el material preferido para la soldadura por resistencia y la pulverización de plasma, mejorando significativamente la eficiencia de la producción.

En componentes aeroespaciales, la conductividad térmica de la aleación de plata y tungsteno facilita la gestión térmica en entornos de alta temperatura. Los equipos aeroespaciales se someten a cargas térmicas extremas durante su funcionamiento, y los materiales tradicionales pueden fallar debido a la tensión térmica. La conductividad térmica de la aleación de plata y tungsteno disipa el calor de los componentes clave y, junto con su bajo coeficiente de expansión térmica, reduce la deformación causada por los ciclos térmicos. Su estabilidad estructural garantiza una larga durabilidad en condiciones de alta temperatura, proporcionando un soporte fiable para las conexiones eléctricas y los componentes de contrapeso de las aeronaves. El valor de la conductividad térmica de la aleación de plata-tungsteno también se refleja en su adaptabilidad. Al ajustar la proporción plata-tungsteno y optimizar la microestructura, la aleación logra un equilibrio entre la conductividad térmica y las propiedades mecánicas en diferentes entornos de alta temperatura. Los tratamientos superficiales, como el pulido o el recubrimiento, mejoran aún más la capacidad de disipación térmica y reducen la resistencia térmica superficial.

Las líneas de optimización incluyen la mejora de la red de conductividad térmica mediante polvo de plata a escala nanométrica o la integración de tecnología de monitorización inteligente para optimizar la gestión térmica en tiempo real. En resumen, el valor de la conductividad térmica de la aleación de plata-tungsteno en entornos de trabajo de alta temperatura proporciona un importante respaldo para su uso en electrónica, soldadura y aeroespacial, mejorando significativamente la fiabilidad y el rendimiento de los componentes.

2.3.6 Rendimiento y mecanismo de resistencia a la corrosión de la aleación de plata y tungsteno

La resistencia a la corrosión de la aleación de plata y tungsteno es una característica importante en diversos entornos de aplicación, ya que le permite resistir la erosión química o electroquímica y mantener su estabilidad y funcionalidad a largo plazo. La resistencia a la corrosión se refiere a la capacidad de un material para resistir la degradación en entornos ácidos, alcalinos o húmedos. La aleación de plata y tungsteno alcanza un excelente rendimiento gracias a la estabilidad química de la plata y a las propiedades antioxidantes del tungsteno. Esta característica le confiere una ventaja significativa en contactos eléctricos, electrodos de soldadura y componentes aeroespaciales.

2.3.6.1 Efectos de diferentes entornos de corrosión en la aleación de plata y tungsteno

El rendimiento de las aleaciones de plata-tungsteno en diferentes entornos corrosivos varía debido a la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

interacción de las condiciones ambientales y la composición química, lo que afecta sus características superficiales y su vida útil. La resistencia a la corrosión de las aleaciones de plata-tungsteno depende principalmente de las características de la plata y el tungsteno, pero los efectos de la corrosión en diferentes entornos sobre ambas fases son diferentes, lo que proporciona una referencia importante para optimizar el diseño del material.

En ambientes húmedos, la aleación de plata-tungsteno presenta cierta resistencia a la corrosión. La fase de plata presenta buena estabilidad química en condiciones de humedad, pero la exposición prolongada puede provocar una ligera oxidación, formando una fina capa de óxido en la superficie, lo que afecta ligeramente la conductividad. Debido a su alta estabilidad química, la fase de tungsteno apenas se corroe significativamente en condiciones de humedad, pero si esta contiene sulfuro o cloruro, la plata puede experimentar reacciones de sulfuro o cloración, aumentando la rugosidad superficial, que debe controlarse mediante medidas de protección superficial. En este entorno, la aleación de plata-tungsteno mantiene su integridad estructural básica y es adecuada para aplicaciones en equipos eléctricos de interior.

En un entorno ácido, la resistencia a la corrosión de la aleación de plata y tungsteno enfrenta mayores desafíos. Las sustancias ácidas como el ácido sulfúrico o el ácido clorhídrico pueden corroer la fase de plata, causando disolución superficial o la formación de productos de corrosión, afectando la conductividad eléctrica y térmica. La fase de tungsteno tiene una fuerte resistencia a la corrosión ácida debido a su alta inercia química, pero los oxidantes en un entorno ácido pueden causar una ligera oxidación superficial del tungsteno para formar compuestos inestables. La densidad microestructural de la aleación juega un papel clave aquí. La porosidad o los defectos pueden acelerar la penetración de la corrosión, y la resistencia debe mejorarse optimizando el proceso de sinterización. Las aplicaciones en condiciones ácidas deben ser cautelosas y son adecuadas para exposición a corto plazo o uso con recubrimientos protectores.

En entornos alcalinos, la resistencia a la corrosión de la aleación de plata y tungsteno es relativamente buena. La plata presenta una alta resistencia a las sustancias alcalinas y su superficie no se corroe fácilmente, manteniendo así su conductividad y propiedades mecánicas. La fase de tungsteno también presenta propiedades químicas estables en entornos alcalinos, lo que reduce el riesgo de corrosión. Sin embargo, si el entorno alcalino contiene oxidantes o se somete a altas temperaturas, la plata puede oxidarse lentamente, lo que afecta su estabilidad a largo plazo. La resistencia a la corrosión de la aleación en este entorno es mejor que en un entorno ácido y es adecuada para piezas de contacto en ciertos equipos industriales.

Las impurezas y los cambios de temperatura en el entorno también afectan el efecto de la corrosión. Un entorno con alto contenido de azufre o cloruro puede agravar la corrosión de la plata, y el aumento de la temperatura acelera las reacciones químicas y aumenta la tasa de erosión. Las propiedades no magnéticas de la aleación de plata-tungsteno aún le otorgan una ventaja en entornos sensibles a las interferencias electromagnéticas, pero la resistencia a la corrosión requiere ajustar las condiciones de uso o las medidas de protección según el entorno específico. En resumen, el impacto de diferentes entornos corrosivos en la aleación de plata-tungsteno revela sus limitaciones y su potencial de resistencia a la corrosión, y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

proporciona una guía para la selección y optimización de materiales.

2.3.6.2 Mecanismo intrínseco de resistencia a la corrosión de la aleación de plata y tungsteno

El mecanismo inherente de la resistencia a la corrosión de la aleación de plata-tungsteno se origina en el efecto sinérgico de la estabilidad química y la microestructura de la plata y el tungsteno, lo que le permite resistir la corrosión en diversos entornos y mantener un rendimiento a largo plazo. La clave de la resistencia a la corrosión reside en reducir la reacción química o la corrosión electroquímica entre el material y el entorno. La aleación de plata-tungsteno logra este objetivo mediante los siguientes mecanismos.

En primer lugar, la estabilidad química de la plata es la base de su resistencia a la corrosión. La plata posee una gran capacidad antioxidante frente al oxígeno y el agua a temperatura ambiente, y no es fácil que se forme una capa gruesa de óxido en la superficie, lo que reduce la acumulación de productos de corrosión. Su ductilidad le permite adaptarse a las tensiones ambientales a nivel microscópico y reducir el riesgo de agrietamiento o desprendimiento. Sin embargo, la plata puede reaccionar ligeramente en entornos con azufre o cloruro para formar sulfuros o cloruros, lo que requiere protección adicional de la fase de tungsteno. La plata humedece las partículas de tungsteno durante la sinterización en fase líquida para formar una estructura de interfaz densa, lo que mejora la resistencia general a la corrosión.

En segundo lugar, la alta inercia química del tungsteno es clave para su resistencia a la corrosión. El tungsteno posee un punto de fusión extremadamente alto y una estructura cristalina estable. No reacciona fácilmente con medios corrosivos comunes en ambientes ácidos, alcalinos o húmedos, y la superficie mantiene su integridad. Su capacidad antioxidante le permite resistir la oxidación incluso en ambientes con altas temperaturas o ricos en oxígeno, formando una fina capa protectora que reduce la erosión. Las partículas de tungsteno forman una estructura de esqueleto en la aleación, dispersando la vía de penetración del medio corrosivo y limitando la expansión de la erosión hacia el interior. Esta característica convierte a la fase de tungsteno en el pilar fundamental de la resistencia a la corrosión de la aleación de tungsteno y plata.

La optimización de la microestructura mejora aún más la resistencia a la corrosión. Durante el proceso de sinterización, la fase líquida de plata rellena los huecos entre las partículas de tungsteno, reduciendo los poros y defectos, e impidiendo que los medios corrosivos penetren a través de las microfisuras. El prensado isostático en caliente o la sinterización por plasma de chispa mejoran la densidad, comprimen los límites de grano y reducen los puntos iniciales de corrosión. La resistencia de la unión interfacial entre la plata y el tungsteno se mejora mediante la molienda de bolas de alta energía y la mezcla uniforme de polvos, lo que mejora la consistencia de la resistencia a la corrosión de la estructura general. Las propiedades no magnéticas también refuerzan el mecanismo de resistencia a la corrosión y evitan la influencia de las interferencias electromagnéticas en la estabilidad de la superficie.

Sin embargo, la resistencia a la corrosión de las aleaciones de plata y tungsteno es limitada. La fase de plata es propensa a la corrosión en ciertas condiciones (como entornos con contenido de azufre), y la alta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dureza de la fase de tungsteno puede producir microfisuras bajo tensión prolongada, acelerando la erosión local. La optimización del mecanismo interno requiere equilibrar la conductividad de la plata y la resistencia a la corrosión del tungsteno. Ajustar la proporción de la composición y la microestructura es fundamental.

2.3.6.3 Medios tecnológicos para mejorar la resistencia a la corrosión

La clave para mejorar la resistencia a la corrosión de la aleación de plata-tungsteno reside en optimizar su rendimiento a largo plazo en diversos entornos, lo cual se logra combinando la preparación del material, el tratamiento superficial y la optimización de las condiciones de uso. La mejora de la resistencia a la corrosión se centra principalmente en la sensibilidad a la corrosión y los defectos microscópicos de la plata, junto con las propiedades antioxidantes del tungsteno, para optimizar la resistencia a la corrosión de la aleación.

En primer lugar, optimizar la proporción de la composición es fundamental para mejorar la resistencia a la corrosión. Aumentar el contenido de tungsteno puede mejorar la resistencia general a la corrosión de la aleación, ya que su alta inercia química reduce la reacción con el medio corrosivo. Con un contenido moderado de plata, la sinterización en fase líquida forma una estructura densa y mejora la fuerza de unión interfacial; sin embargo, un contenido de plata demasiado alto puede aumentar el riesgo de corrosión, por lo que es necesario lograr un equilibrio ajustando la proporción. Los aditivos traza, como el molibdeno o el cromo, pueden mejorar la resistencia a la oxidación del tungsteno, pero su contenido debe controlarse para evitar afectar la conductividad.

En segundo lugar, la optimización del proceso de sinterización puede mejorar significativamente la densidad de la microestructura. La sinterización en fase líquida rellena los huecos entre las partículas de tungsteno mediante el efecto humectante de la plata, reduce la porosidad y previene la penetración de medios corrosivos. La tecnología de sinterización por plasma de chispa forma rápidamente una estructura densa mediante corriente pulsada y alta presión, inhibe el crecimiento excesivo de grano y mejora la uniformidad de la superficie. El proceso de prensado isostático en caliente elimina los defectos residuales mediante alta presión omnidireccional, lo que mejora aún más la consistencia de la resistencia a la corrosión. El entorno de sinterización al vacío o con argón de alta pureza previene la introducción de impurezas oxidadas, mantiene la pureza del tungsteno y la plata y reduce la sensibilidad a la corrosión.

En tercer lugar, la tecnología de tratamiento de superficies es un método eficaz para mejorar la resistencia a la corrosión. Los recubrimientos anticorrosivos aplicados mediante deposición química en fase de vapor (CFP) asistida por plasma, como el nitruro de titanio o el carburo de cromo, pueden formar una capa protectora sobre la superficie de la aleación, aislar los medios corrosivos y reducir la oxidación o la sulfuración de la plata. El pulido electroquímico optimiza el acabado superficial, reduce el punto inicial de corrosión y mejora la resistencia a la corrosión. El tratamiento de pasivación de superficies mejora aún más la resistencia a la corrosión mediante la formación de una capa de óxido estable, especialmente adecuada para entornos con azufre o cloruro. Estudios han demostrado que los recubrimientos adecuados pueden reducir significativamente las tasas de corrosión y prolongar la vida útil de los componentes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En cuarto lugar, la gestión ambiental y la optimización de las condiciones de uso pueden mejorar aún más la resistencia a la corrosión. En entornos húmedos o ácidos, utilice diseños sellados o protección con gas inerte para reducir el contacto con medios corrosivos. En aplicaciones de soldadura o eléctricas, controle parámetros operativos como la temperatura y la humedad para reducir el riesgo de corrosión. La tecnología de monitoreo inteligente detecta el estado de la corrosión en tiempo real mediante sensores integrados, optimiza los ciclos de mantenimiento y previene la erosión excesiva. El diseño de material con gradiente funcional aumenta el contenido de tungsteno en la superficie para mejorar la capa anticorrosiva, a la vez que conserva la conductividad de la fase interna de plata.

La aplicación combinada de estos métodos de proceso permite que la aleación de plata y tungsteno tenga un buen rendimiento en entornos húmedos, ácidos o industriales, lo que prolonga la vida útil de los componentes y mejora su fiabilidad. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de recubrimientos autorreparadores para reparar dinámicamente los daños por corrosión o la mejora de la uniformidad de la superficie mediante polvo de tungsteno a escala nanométrica.

2.4 CTIA GROUP LTD. Ficha de datos de seguridad de aleación de tungsteno y plata

La MSDS (Hoja de Datos de Seguridad del Material) suele ser proporcionada por el fabricante de China Tungsten Intelligent Manufacturing. Esta hoja contiene las propiedades físicas y químicas del material, instrucciones de uso seguro e información sobre posibles riesgos. Según la información pertinente disponible, el contenido de la MSDS de la aleación de plata-tungsteno puede referirse a las normas generales para aleaciones de tungsteno o de plata.

Información de composición: La proporción de plata (Ag) y tungsteno (W) (por ejemplo, 30%-70% Ag, 70%-30% W) depende del producto específico. Propiedades físicas: Densidad aproximadamente 12,0-15,0 g/cm³, el rango de punto de fusión varía según el contenido de plata, conductividad 40%-60% IACS. Peligros para la salud: La plata y el tungsteno por sí mismos no suelen ser significativamente tóxicos. Medidas de seguridad: Se recomienda utilizar equipo de protección.



CTIA GROUP LTD Aleación de tungsteno y plata

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Silver Tungsten Alloy Introduction

1. Overview of Silver Tungsten Alloy

Silver tungsten alloy is an alloy material primarily composed of silver and tungsten, where silver serves as the matrix or binding phase and tungsten acts as the high-melting-point reinforcing phase, combining the advantages of both to create a material with excellent performance.

2. Features of Silver Tungsten Alloy

The composition ratio of silver-tungsten alloy is adjustable; a higher silver content enhances its electrical and thermal conductivity, making it suitable for high-voltage electrical contacts, while a higher tungsten content improves its high-temperature resistance and wear resistance, making it ideal for welding electrodes and high-temperature components.

3. The Composition Ratio of Silver Tungsten Alloy

Materials	Composition (%weight)	Density (/g.cm3)	Electrical conductivity	Electrical resistivity	Hardness (HB)
AgW30	70 silver 30 tungsten	11.8-12.2	73	2.3	75
AgW40	60 silver 40 tungsten	12.5-12.8	64	2.6	85
AgW50	50 silver 50 tungsten	13.2-13.5	73-56	2.3-3.0	105
AgW55	45 silver 55 tungsten	13.6-13.9	54	3.2	115
AgW60	40 silver 60 tungsten	14.0-14.4	60-50	2.8-3.3	125
AgW65	35 silver 65 tungsten	14.5-14.9	50	3.4	135
AgW70	30 silver 70 tungsten	14.7-15.1	48	3.5	150
AgW80	20 silver 80 tungsten	16.1-16.5	37	4.5	180

4. Production Methods for Silver Tungsten Alloy

The preparation method for tungsten-silver alloy is the same as that for tungsten-copper alloy. Due to tungsten's high melting point and its inability to alloy with silver, traditional methods cannot be used. Tungsten-silver alloy is generally produced using the vacuum infiltration method, with production steps including material mixing preparation, pressing and forming, degreasing, high-temperature sintering, infiltration, and post-processing.

5. Applications of Silver Tungsten Alloy

Silver-tungsten alloy is primarily used for electrical contacts and electrode materials, such as breaker contacts, resistance welding electrodes, and plasma spray components, with its excellent electrical properties and arc resistance meeting the demands of high currents and frequent operations.

6. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: silver-tungsten.net

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Capítulo 3: Observación de las características de la microestructura y correlación del rendimiento de la aleación de plata-tungsteno

La microestructura de la aleación de plata-tungsteno es fundamental para su rendimiento, afectando directamente su conductividad eléctrica, conductividad térmica, dureza y resistencia a la corrosión. Esta microestructura se forma mediante pulvimetalurgia, y la interacción entre la plata como fase aglutinante y la fase de refuerzo de tungsteno conforma la morfología única del grano, la distribución de fases y las características de la interfaz. Estas características estructurales están estrechamente relacionadas con las propiedades mecánicas y funcionales de la aleación, lo que proporciona una base importante para optimizar el proceso de preparación y mejorar el rendimiento de la aplicación.

3.1 Observación de las características de la microestructura de la aleación de plata y tungsteno

La microestructura de la aleación de plata y tungsteno se observó mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), microscopía electrónica de transmisión (MET) y difracción de rayos X (DRX), revelando su estructura cristalina interna y distribución de fases. Estas observaciones proporcionan evidencia directa para comprender las propiedades de la aleación, demostrando la interacción entre la plata y el tungsteno durante el proceso de sinterización y su efecto en la microestructura.

3.1.1 Morfología del grano y características de tamaño

La morfología del grano y las características de tamaño de la aleación de plata-tungsteno son los aspectos centrales de la microestructura, que afectan directamente las propiedades mecánicas y la durabilidad de la aleación. La morfología del grano se manifiesta principalmente como una estructura poligonal o casi esférica de partículas de tungsteno, mientras que la fase de plata presenta una distribución continua o en malla alrededor de las partículas de tungsteno. Las partículas de tungsteno suelen existir en un tamaño mayor y proporcionan soporte estructural como fase de refuerzo, mientras que la fase de plata rellena los huecos en la sinterización en fase líquida para formar granos más finos. Esta diferencia morfológica se deriva de las propiedades físicas y químicas de ambos. El alto punto de fusión del tungsteno lo mantiene en estado sólido durante la sinterización, mientras que el bajo punto de fusión de la plata hace que se funda y humedezca las partículas de tungsteno.

El tamaño del grano se ve afectado por el proceso de preparación y las condiciones de sinterización. El tamaño de partícula del polvo de tungsteno inicial suele ser de nivel submicrónico a micrométrico, que puede refinarse aún más a escala nanométrica mediante molienda de bolas de alta energía. La temperatura y el tiempo de sinterización son fundamentales para el crecimiento del grano. La sinterización a alta temperatura y a largo plazo puede provocar un crecimiento anormal de partículas de tungsteno, mientras que la fase de plata forma granos más grandes debido a una mayor fluidez. Procesos optimizados como la sinterización por plasma de chispa (SPS) inhiben el crecimiento excesivo de grano mediante un calentamiento y presurización rápidos, manteniendo las partículas de tungsteno dentro de un rango de tamaño más pequeño, y la fase de plata presenta una distribución fina y uniforme. Los resultados de la observación muestran que cuanto menor es el tamaño del grano, mayor es la densidad del límite de grano,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y la dureza y la resistencia de la aleación suelen aumentar en consecuencia. La uniformidad de la morfología y el tamaño del grano influyen significativamente en el rendimiento. Una distribución desigual del grano puede provocar una concentración local de tensiones, lo que reduce la resistencia a la flexión y la tenacidad. Durante el proceso de sinterización, el prensado isostático en caliente (HIP) puede eliminar microdefectos y mejorar la consistencia del grano mediante presión omnidireccional. La aplicación de polvo de tungsteno a escala nanométrica refina aún más los granos, mejora el efecto de refuerzo del límite de grano y mejora significativamente la resistencia de la aleación al desgaste y la erosión por arco. La observación de la morfología del grano también revela el grado de humectación de las partículas de plata y tungsteno. Una buena humectación forma una estructura densa, reduce la porosidad y mejora la estabilidad general del rendimiento. En resumen, la morfología del grano y las características de tamaño de las aleaciones de plata y tungsteno están reguladas por el proceso de preparación, lo que afecta significativamente su microestructura y propiedades macroscópicas.

3.1.2 Distribución de fases y características de la interfaz

El estado de distribución de fases y las características de la interfaz de la aleación de plata-tungsteno son componentes importantes de la microestructura, que determinan directamente la conductividad eléctrica, la conductividad térmica y la resistencia a la corrosión de la aleación. La distribución de fases se manifiesta principalmente en que las partículas de tungsteno se incrustan en la matriz de plata o fase de enlace como una fase dispersa, y la fase de plata forma una red continua o agregados locales alrededor de las partículas de tungsteno. La fracción de volumen de la fase de tungsteno suele ser alta y ocupa la mayor parte del volumen, mientras que la fase de plata rellena los huecos durante el proceso de sinterización y mejora la unión entre las fases. Esta distribución se logra mediante pulvimetalurgia, y la uniformidad de la mezcla de polvos y los parámetros de sinterización tienen un impacto significativo en ella. Las características de la interfaz son clave para la distribución de fases, y la fuerza de unión interfacial entre la plata y el tungsteno afecta directamente el rendimiento general de la aleación. Las observaciones muestran que la fase de plata humedece la superficie de las partículas de tungsteno durante la sinterización en fase líquida, formando una capa de interfaz compacta, lo que reduce la formación de huecos y defectos. El grado de humectación en la interfaz depende del contenido de plata y la temperatura de sinterización. Con un contenido de plata moderado, la interfaz presenta una buena unión y una transición suave; un contenido excesivo de plata puede provocar un exceso de fase líquida de plata, formando acumulaciones microscópicas en la interfaz, lo que afecta la estabilidad. La capa de fase de plata entre las partículas de tungsteno también actúa como amortiguador, absorbiendo la tensión térmica o mecánica y mejorando la tenacidad de la aleación.

La uniformidad de la distribución de fases es crucial para el rendimiento. Una distribución desigual puede provocar disminuciones localizadas de la conductividad eléctrica o térmica, especialmente con altos contenidos de tungsteno. Una cantidad insuficiente de fase de plata puede formar poros y aumentar la resistencia eléctrica o térmica. La optimización de los procesos de sinterización, como la molienda de bolas de alta energía y la sinterización al vacío, puede mejorar la consistencia de la distribución de fases y reducir la acumulación de impurezas y óxidos en la interfaz. La observación de las características de la interfaz también revela la función del refuerzo del límite de grano. La fase de plata limita el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

movimiento de dislocación en el límite de grano y mejora la dureza. Sin embargo, si la fuerza de unión en la interfaz es insuficiente, pueden producirse microfisuras, lo que reduce la durabilidad.

La aplicación de polvo de tungsteno a nanoescala optimiza aún más la distribución de fases y las características de la interfaz. Las partículas de pequeño tamaño aumentan el área de la interfaz, mejoran la eficiencia de humectación de la plata y forman una microestructura más densa. El proceso de prensado isostático en caliente comprime la interfaz a alta presión para mejorar la fuerza de unión entre las fases y reducir los defectos. La reacción química o difusión en la interfaz también afecta las características. Una atmósfera de sinterización adecuada permite controlar el grado de reacción y mantener la pureza del tungsteno y la plata. En resumen, el estado de distribución de fases y las características de la interfaz de la aleación de plata-tungsteno se optimizan mediante el control del proceso, lo cual está directamente relacionado con sus propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas, lo que proporciona una base importante para la mejora del rendimiento.

3.1.3 Manifestaciones microscópicas de porosidad y defectos

La porosidad y la manifestación microscópica de defectos en las aleaciones de plata-tungsteno son aspectos importantes de la microestructura que afectan directamente las propiedades mecánicas, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión de la aleación. La porosidad se refiere a la proporción de huecos sin rellenar en la aleación, que suele estar determinada por el proceso de sinterización y las características de la materia prima. Los defectos incluyen microfisuras, zonas desunidas y acumulación de impurezas, que en conjunto determinan la densidad y la estabilidad generales de la aleación. La observación de estas características ayuda a identificar cuellos de botella en el rendimiento y a optimizar el proceso de preparación.

La porosidad en las aleaciones de plata y tungsteno se manifiesta principalmente como pequeños huecos dispersos entre la fase de plata y la fase de tungsteno, y la morfología es mayormente esférica o irregular. La formación de poros se origina por la encapsulación de gas durante la mezcla de polvo o por una fase líquida de plata insuficiente para llenar completamente los huecos durante la sinterización. Las observaciones muestran que las áreas con mayor porosidad suelen aparecer donde las partículas de tungsteno son densas, y la distribución desigual de la fase de plata puede agravar este fenómeno. Una alta porosidad conducirá a una disminución de la conductividad eléctrica y térmica, porque el calor y la corriente son difíciles de transferir en los huecos. Al mismo tiempo, los poros también pueden convertirse en puntos de concentración de tensión, reduciendo la resistencia a la flexión y la tenacidad. El análisis SEM muestra que cuando la porosidad está por debajo de cierto nivel, el rendimiento de la aleación mejora significativamente, especialmente en aplicaciones de alta confiabilidad.

Las manifestaciones microscópicas de los defectos incluyen microfisuras e interfaces no adheridas, que suelen presentarse en la interfaz plata-tungsteno o entre partículas de tungsteno. Las microfisuras pueden deberse a la tensión térmica o la contracción por enfriamiento durante la sinterización, especialmente cuando los coeficientes de expansión térmica de las fases de plata y tungsteno son muy diferentes. La interfaz no adherida se manifiesta cuando la fase de plata no humedece completamente las partículas de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno, lo que resulta en un contacto local deficiente y afecta la integridad estructural. Las observaciones mediante TEM muestran que las áreas defectuosas suelen ir acompañadas de la acumulación de impurezas, que pueden introducirse cuando la atmósfera de sinterización no es adecuada, lo que debilita aún más la unión interfacial. La presencia de defectos también puede acelerar la penetración de medios corrosivos y reducir la resistencia a la corrosión.

El control de la porosidad y los defectos es clave para optimizar la microestructura. Los procesos de sinterización, como el prensado isostático en caliente, comprimen el material mediante presión omnidireccional, lo que reduce significativamente los poros y las microfisuras y mejora la densidad. La sinterización por plasma de chispa inhibe la formación de defectos y mejora la unión de la interfaz mediante un calentamiento y una presurización rápidos. El uso de materias primas de alta pureza y la mezcla uniforme de polvos pueden reducir las impurezas y las inclusiones de gas, así como la tasa inicial de defectos. Los resultados de las observaciones muestran que la porosidad de la aleación optimizada de plata-tungsteno se puede reducir a un nivel extremadamente bajo, la densidad de defectos se reduce significativamente y se mejora la consistencia del rendimiento. En resumen, las manifestaciones microscópicas de la porosidad y los defectos se pueden mejorar mediante el control del proceso, lo cual está directamente relacionado con el rendimiento integral de la aleación.

3.1.4 Diferencias de microestructura bajo diferentes procesos de preparación

La microestructura de la aleación de plata-tungsteno presenta diferencias significativas debido a los distintos procesos de preparación, como la sinterización tradicional de polvo prensado, el prensado isostático en caliente (HIP), la sinterización por plasma de chispa (SPS), etc. Cada método tiene un efecto único en la morfología del grano, la distribución de fases y el estado de los defectos. Observar estas diferencias ayuda a seleccionar el mejor proceso para una aplicación específica y a optimizar las propiedades de la aleación.

El proceso tradicional de sinterización de polvo prensado es un método clásico para la preparación de aleaciones de plata y tungsteno. La microestructura se caracteriza por partículas de tungsteno dispersas en la matriz de plata, y la fase de plata forma una red o agregados locales. El tamaño de grano es grande, las partículas de tungsteno son mayoritariamente poligonales, y la fase de plata rellena los huecos debidos a la sinterización en fase líquida, pero su distribución es irregular. La porosidad es relativamente alta y se distribuye entre las partículas de tungsteno o en las zonas débiles de la fase de plata. Defectos como microfisuras e interfaces no adheridas son más comunes. La conductividad eléctrica y térmica son limitadas y la dureza es media, pero el coste de preparación es bajo, lo que resulta adecuado para la producción en masa.

El proceso de prensado isostático en caliente (HIP) mejora significativamente la microestructura mediante un tratamiento omnidireccional de alta presión y alta temperatura. Las partículas de tungsteno se distribuyen de forma más uniforme, la fase de plata forma una red continua, la porosidad se reduce considerablemente y se reducen defectos como las microfisuras. El tamaño de grano se refina gracias a la compresión a alta presión, se mejora la fuerza de unión de la interfaz y se presenta una transición suave.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Se mejoran la conductividad eléctrica y térmica, y la dureza y la resistencia a la flexión se mejoran significativamente, lo que resulta adecuado para aplicaciones que requieren alta densidad y alta fiabilidad, como los contrapesos aeroespaciales. Las desventajas del proceso HIP son la complejidad del equipo y el alto coste, lo que limita su uso generalizado.

El proceso de sinterización por plasma por chispa (SPS) forma una microestructura única mediante corriente pulsada y calentamiento rápido. Las partículas de tungsteno se mantienen pequeñas, la fase de plata se distribuye uniformemente, los poros y defectos son prácticamente invisibles y la densidad del límite de grano es alta. El efecto de humectación en la interfaz es excelente y la fase de plata se combina estrechamente con el tungsteno, reduciendo los puntos de concentración de tensiones. La conductividad eléctrica, la conductividad térmica y la dureza alcanzan un alto nivel, lo que resulta especialmente adecuado para aplicaciones de contacto y electrodos de alto rendimiento. La rapidez del proceso SPS inhibe el crecimiento excesivo de grano, pero exige altos requisitos de pureza de la materia prima y tamaño de partícula, y requiere un control preciso del proceso. Las diferencias microestructurales entre los distintos procesos de preparación también se ven afectadas por la atmósfera y los parámetros de sinterización. El vacío o una atmósfera inerte reducen las impurezas oxidativas y mejoran la distribución de fases; la sinterización a alta temperatura y prolongada puede provocar el crecimiento del grano y afectar la uniformidad. Los resultados de la observación muestran que la microestructura del proceso SPS es la más densa, seguida de la HIP, y la sinterización tradicional con polvo prensado es deficiente.

3.2 Relación intrínseca entre la estructura de la aleación de plata y tungsteno y las propiedades macroscópicas

Existe una estrecha relación intrínseca entre la microestructura de la aleación de plata-tungsteno y sus propiedades macroscópicas. La estructura del grano, la distribución de fases y las características de la interfaz afectan la resistencia, la tenacidad, la conductividad eléctrica y la conductividad térmica de la aleación mediante mecanismos físicos y químicos. Esta correlación proporciona una base teórica para optimizar el proceso de preparación y mejorar el rendimiento de la aplicación. La interacción entre la plata como fase aglutinante y la fase de refuerzo de tungsteno configura la microestructura, que a su vez determina el rendimiento de la aleación en contactos eléctricos, electrodos de soldadura y componentes aeroespaciales.

3.2.1 Efecto de la estructura del grano sobre la resistencia y la tenacidad

La estructura del grano es fundamental en la microestructura de las aleaciones de plata-tungsteno. La morfología, el tamaño y la orientación de los granos afectan la resistencia y la tenacidad de la aleación mediante el fortalecimiento de los límites de grano y los mecanismos de movimiento por dislocación. La resistencia se refiere a la capacidad de una aleación para resistir la deformación o la fractura, mientras que la tenacidad refleja su capacidad para absorber energía y resistir la propagación de grietas. Los cambios en la estructura del grano determinan directamente el rendimiento de ambas. El efecto del tamaño del grano en la resistencia sigue el efecto Hall-Pasch. Cuanto más pequeño sea el grano, mayor será la densidad del límite de grano, mayor será la restricción al movimiento de dislocación y mejorarán

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

el límite elástico y la resistencia a la tracción. En la aleación de plata-tungsteno, las partículas de tungsteno sirven como fase de refuerzo, y el tamaño del grano suele ser mayor, mientras que la fase de plata forma granos más finos debido a la sinterización en fase líquida. Los procesos de sinterización como la sinterización por plasma de chispa (SPS) inhiben el crecimiento del grano mediante un calentamiento rápido, refinan las partículas de tungsteno y las fases de plata, y mejoran significativamente la resistencia. Las observaciones muestran que la aleación preparada a partir de polvo de tungsteno a escala nanométrica tiene un tamaño de grano reducido y una resistencia significativamente mejorada, lo que es particularmente adecuado para aplicaciones que requieren alta resistencia a la flexión.

El efecto de los límites de grano en la tenacidad es más complejo. Los granos finos aumentan el área del límite de grano, limitan la propagación de grietas y mejoran la tenacidad. Sin embargo, si la fuerza de unión del límite de grano es insuficiente, pueden inducirse microgrietas, lo que reduce la tenacidad. La fase de plata humedece las partículas de tungsteno en el límite de grano para formar una capa amortiguadora, absorber la tensión mecánica o térmica y mejorar la tenacidad. El prensado isostático en caliente (HIP) mejora la unión del límite de grano, reduce los defectos y optimiza el rendimiento de tenacidad mediante alta presión. Cuando el contenido de plata es moderado, la fase líquida llena el espacio y el efecto de fortalecimiento del límite de grano es significativo. Un contenido excesivo de plata puede provocar que el límite de grano sea demasiado blando y que disminuya la tenacidad. La orientación y la morfología del grano también afectan al rendimiento. Las partículas de tungsteno poligonales o casi esféricas dispersan la tensión, mejoran la resistencia y la tenacidad, mientras que las partículas irregulares pueden causar concentración local de la tensión y reducir la estabilidad. La temperatura y el tiempo de sinterización regulan el crecimiento del grano. Una temperatura excesiva puede causar un crecimiento anormal y afectar la uniformidad. La observación microestructural muestra que las aleaciones de plata-tungsteno con una estructura de grano optimizada logran un equilibrio entre resistencia y tenacidad, y son adecuadas para aplicaciones de contacto en cargas dinámicas y entornos de arco. Las líneas de optimización incluyen el refinamiento de los granos mediante nanoestructuración o el ajuste de la distribución de los límites de grano mediante un diseño de gradiente funcional para mejorar el rendimiento de forma integral.

3.2.2 Correlación entre la distribución de fases y la conductividad eléctrica y térmica

La distribución de fases es una característica importante de la microestructura de la aleación de plata-tungsteno. El estado de distribución y la unión interfacial de las fases afectan directamente la conductividad eléctrica y la conductividad térmica, mostrando una ley de correlación específica. La conductividad eléctrica y la conductividad térmica reflejan la eficiencia de transferencia de corriente y calor, respectivamente. La uniformidad y la continuidad de la distribución de fases son clave para determinar estas propiedades.

La fase de plata es la principal fuente de conductividad eléctrica y térmica. La plata forma una red continua como matriz o fase de enlace, y los electrones y el calor se transfieren eficientemente a través de ella. Si bien la conductividad eléctrica y térmica de la fase de tungsteno es baja, su distribución uniforme reduce los puntos de concentración de resistencia eléctrica y térmica y mejora el rendimiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

general. La continuidad de la distribución de fases se determina mediante la sinterización en fase líquida. Cuando el contenido de plata es alto, la red está más conectada y la conductividad eléctrica y térmica mejora significativamente; cuando el contenido de tungsteno es predominante, la fase de plata puede romperse y el rendimiento disminuye. Las observaciones muestran que la estructura en la que la fase de plata envuelve uniformemente las partículas de tungsteno presenta la mejor conductividad eléctrica y térmica.

Las características de la interfaz tienen un impacto significativo en el rendimiento. La fuerza de unión interfacial entre la plata y el tungsteno se mejora mediante la humectación, lo que reduce los huecos y defectos, y mejora la conductividad eléctrica y térmica. Cuando el espesor de la capa de fase de plata en la interfaz es moderado, la transferencia de calor y corriente es fluida. Una capa de plata demasiado gruesa puede aumentar la resistencia térmica, mientras que una capa demasiado delgada afecta la continuidad. Los procesos de sinterización, como el prensado isostático en caliente, comprimen la interfaz y la sinterización por plasma de chispa optimiza la distribución de fases, mejorando significativamente la consistencia del rendimiento.

La fracción volumétrica de la distribución de fases también muestra un patrón regular. A medida que aumenta el contenido de plata, la conductividad eléctrica y térmica tienden a aumentar, pero al superar cierta proporción, este aumento se debilita debido al aumento del efecto barrera de la fase de tungsteno. A medida que aumenta el contenido de tungsteno, la conductividad eléctrica y térmica disminuyen, pero la estabilidad estructural mejora, lo cual resulta adecuado para aplicaciones de alta temperatura. Las observaciones microestructurales muestran que la distribución de fases optimizada permite que la aleación de plata-tungsteno tenga un buen rendimiento en contactos de interruptores automáticos de alta tensión y sustratos de disipación de calor.

3.2.3 Efectos de la porosidad y los defectos en la dureza y la resistencia a la corrosión

La porosidad y los defectos son características importantes de la microestructura de la aleación de plata-tungsteno, que afectan directamente la dureza y la resistencia a la corrosión, y determinan su rendimiento en entornos de alto desgaste y corrosión. La porosidad se refiere a la proporción de huecos sin rellenar en el material, y los defectos incluyen microfisuras e interfaces no adheridas. Estos factores influyen en la densidad y la estabilidad superficial.

El efecto de la porosidad en la dureza se refleja principalmente en su interferencia con los límites de grano y la distribución de fases. Una mayor porosidad provocará discontinuidad en los límites de grano, dificultará el movimiento de dislocación y el deslizamiento de los límites de grano, y reducirá la dureza. En las aleaciones de plata-tungsteno, los poros suelen distribuirse entre las partículas de tungsteno o en las zonas débiles de la fase de plata, lo que reduce la resistencia general a la compresión y al desgaste del material. La optimización de los procesos de sinterización, como el prensado isostático en caliente (HIP), comprime los poros mediante presión omnidireccional, lo que mejora significativamente la densidad y la dureza. Los defectos como las microfisuras debilitan aún más la dureza. Estas grietas pueden deberse a tensión térmica o contracción por enfriamiento, especialmente en la interfaz plata-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno. La dureza disminuye significativamente cuando la densidad de defectos es alta. Las observaciones muestran que la reducción de la porosidad y la densidad de defectos puede aumentar la dureza a un nivel superior, lo cual es adecuado para aplicaciones que requieren alta resistencia al desgaste.

La resistencia a la corrosión se ve afectada de forma más directa por la porosidad y los defectos. Los poros actúan como canales para la penetración de medios corrosivos, lo que aumenta el riesgo de erosión superficial, especialmente en ambientes húmedos o ácidos, donde la humedad residual o los productos químicos en los poros aceleran el proceso de corrosión. Defectos como interfaces no adheridas o microfisuras proporcionan puntos iniciales para la corrosión, a través de los cuales los medios corrosivos se difunden hacia el interior, reduciendo la estabilidad química de la aleación. La fase de plata puede oxidarse o sulfurarse en los poros, y aunque la fase de tungsteno presenta una fuerte resistencia a la corrosión, aún pueden formarse compuestos inestables en los defectos. La optimización del proceso de sinterización, como la sinterización por plasma de chispa (SPS), reduce la porosidad y los defectos, mejora la unión de la interfaz y mejora significativamente la resistencia a la corrosión. Las observaciones microestructurales muestran que la estructura densa prolonga la vida útil de las aleaciones de plata y tungsteno en ambientes corrosivos, lo que las hace especialmente adecuadas para equipos industriales. Las estrategias de optimización incluyen la reducción de defectos iniciales mediante materias primas de alta pureza o el uso de polvos a escala nanométrica para mejorar la densidad. El control de la porosidad y los defectos se logra mediante el ajuste de los parámetros del proceso, siendo fundamental equilibrar la dureza y la resistencia a la corrosión.

3.3 Evolución de la microestructura de la aleación de plata y tungsteno

La microestructura de la aleación de plata-tungsteno evoluciona durante el proceso de preparación y uso, afectado por la proporción de la composición, las condiciones de sinterización y los factores ambientales. Esta ley de evolución revela la relación dinámica entre la estructura y el rendimiento, y proporciona una base importante para la optimización del proceso y la predicción de la vida útil. Los factores que impulsan la evolución de la microestructura incluyen el cambio de fase, el crecimiento del grano y la aparición de defectos, siendo la interacción entre la plata y el tungsteno el mecanismo central.

3.3.1 Evolución de la microestructura causada por cambios en la relación de composición

El cambio en la proporción de la composición es el principal factor determinante de la evolución de la microestructura de la aleación de plata-tungsteno. La proporción de plata y tungsteno afecta directamente la morfología del grano, la distribución de fases y el estado de porosidad, configurando diferentes características microestructurales. Este proceso de evolución se logra mediante el proceso de sinterización y el tratamiento térmico, lo que refleja el ajuste dinámico de las propiedades del material.

Cuando el contenido de plata aumenta, la microestructura cambia significativamente. La plata, como fase de unión de bajo punto de fusión, se funde en la sinterización en fase líquida, humedece las partículas de tungsteno y rellena los huecos, reduciendo la porosidad y mejorando la densidad. La morfología del grano evoluciona hacia una distribución de red de fase de plata, las partículas de tungsteno se envuelven

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

más uniformemente y la fuerza de unión interfacial mejora. Cuando el contenido de plata es moderado, la fase de plata forma una red continua, la densidad del límite de grano aumenta, la microestructura tiende a ser delicada y la dureza y la tenacidad mejoran. Sin embargo, un contenido de plata demasiado alto puede conducir a un exceso de fase líquida, la fase de plata se acumula para formar granos más grandes, la porosidad se reduce, pero los límites de grano son demasiado blandos, lo que afecta la estabilidad. Las observaciones muestran que la conductividad eléctrica y la conductividad térmica de las aleaciones con una alta proporción de plata mejoran, pero la resistencia al desgaste puede disminuir.

Al aumentar el contenido de tungsteno, la microestructura evoluciona hacia una estructura de esqueleto dominada por partículas de tungsteno. El tungsteno permanece en estado sólido como fase de refuerzo de alto punto de fusión, el tamaño de grano es mayor, la distribución de la fase de plata se reduce y la capacidad de rellenar huecos se reduce. La porosidad puede aumentar, especialmente cuando la fase líquida de plata es insuficiente, las microfisuras y las interfaces no adheridas aumentan, y la densidad disminuye. El efecto de refuerzo del límite de grano se debilita, la dureza aumenta, pero la tenacidad disminuye, y la conductividad eléctrica y térmica disminuyen a medida que disminuye la fase de plata. La optimización del proceso de sinterización, como el prensado isostático en caliente, puede comprimir los poros y mejorar la consistencia estructural. Las aleaciones con una alta proporción de tungsteno son adecuadas para aplicaciones de alta temperatura y resistencia al arco eléctrico.

Los cambios en la proporción de la composición también afectan la uniformidad de la distribución de fases. Un desequilibrio en la proporción plata-tungsteno puede provocar la sedimentación de partículas de tungsteno o la acumulación local de fases de plata, una mayor heterogeneidad microestructural y una menor consistencia del rendimiento. La uniformidad de la mezcla de polvos y el control de la atmósfera de sinterización pueden reducir este efecto y mantener la estabilidad de la distribución de fases. El proceso de tratamiento térmico impulsa aún más la evolución. El tratamiento a alta temperatura y a largo plazo puede provocar el crecimiento del grano y la reorganización de fases, y es necesario controlar los parámetros para evitar una evolución excesiva. Los resultados de la observación muestran que el ajuste dinámico de la proporción plata-tungsteno logra la optimización del rendimiento a través de la evolución microestructural, que es adecuada para diferentes requisitos de aplicación. Las líneas de optimización incluyen el refinamiento de granos mediante polvos a escala nanométrica o el ajuste de las proporciones de los componentes locales mediante el diseño de gradientes funcionales. La evolución microestructural causada por los cambios en las proporciones de los componentes revela la adaptabilidad de las aleaciones de plata-tungsteno y proporciona una base para el refinamiento del proceso de preparación.

3.3.2 Transformación de la microestructura durante el tratamiento térmico

El proceso de tratamiento térmico es una etapa importante en la evolución de la microestructura de la aleación de plata-tungsteno. Influye significativamente en el rendimiento de la aleación al controlar la temperatura y el tiempo para inducir el crecimiento del grano, el ajuste de fase y la reducción de defectos. El tratamiento térmico incluye el recocido, el temple y el envejecimiento. Las propiedades físicas y químicas de la plata y el tungsteno muestran diferentes reacciones en este proceso, lo que configura nuevas características microestructurales. Durante el proceso de recocido, la microestructura de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aleación de plata-tungsteno sufre una transformación significativa. El recocido a baja temperatura promueve la redistribución de la fase de plata, y la fase líquida rellena los poros residuales, mejorando la fuerza de unión interfacial. Las partículas de tungsteno se mantienen sólidas, los límites de grano tienden a ser lisos y las microfisuras y defectos disminuyen gradualmente. El tamaño del grano puede aumentar ligeramente, pero el crecimiento excesivo se puede suprimir controlando el tiempo de recocido para mantener una estructura fina. Las observaciones muestran que la densidad de la aleación recocida mejora, así como la dureza y la conductividad, lo que resulta especialmente adecuado para aplicaciones de contacto que requieren un rendimiento uniforme.

El tratamiento de temple induce cambios de fase mediante un enfriamiento rápido. La fase de plata forma granos finos debido a la rápida solidificación, y la distribución de partículas de tungsteno es más uniforme, pero la tensión de enfriamiento puede causar microfisuras. El estado de distribución de fases se ajusta y la red de la fase de plata puede romperse o reorganizarse, lo que afecta la conductividad térmica y eléctrica. Defectos como las interfaces no adheridas pueden aumentar debido a la concentración de tensiones, por lo que es necesario optimizar la velocidad de enfriamiento para reducir este efecto. La microestructura después del temple es adecuada para piezas que requieren alta resistencia y respuesta rápida, pero la tenacidad puede verse ligeramente reducida.

El tratamiento de envejecimiento optimiza la microestructura mediante un tratamiento a baja temperatura a largo plazo. La fase de plata se estabiliza gradualmente, la interfaz de las partículas de tungsteno humedecidas se mejora y la porosidad se reduce aún más. Se inhibe el crecimiento del grano, la estructura del esqueleto de tungsteno se vuelve más densa y la densidad de defectos se reduce significativamente. El ajuste de fase mejora la fuerza de unión interfacial de la plata y el tungsteno, además de mejorar la dureza y la resistencia a la corrosión. Los resultados de la observación muestran que la aleación envejecida tiene un buen rendimiento en servicio a largo plazo y es especialmente adecuada para contrapesos aeroespaciales y electrodos de soldadura. El control preciso de los parámetros del tratamiento térmico es clave. Una temperatura o un tiempo excesivos pueden provocar un tamaño de grano excesivo y afectar el rendimiento. Las estrategias de optimización incluyen el control de las transiciones de fase mediante un tratamiento térmico segmentado o el ajuste de parámetros en tiempo real en combinación con tecnología de monitorización inteligente. La transformación microestructural durante el tratamiento térmico se optimiza dinámicamente mediante la fluidez de la plata y la estabilidad del tungsteno, lo que correlaciona el rendimiento integral de la aleación.

3.3.3 Efecto del entorno del servicio en la microestructura y la retroalimentación del rendimiento

El entorno de servicio tiene un impacto significativo en la evolución de la microestructura de la aleación de plata-tungsteno. Condiciones ambientales como la temperatura, la humedad, los medios químicos y la tensión mecánica modifican las características estructurales mediante efectos físicos y químicos, que a su vez influyen en el rendimiento de la aleación. Esta influencia proporciona una base importante para la predicción de la vida útil y las estrategias de mantenimiento. Un entorno de alta temperatura acelera la evolución microestructural de la aleación de plata-tungsteno. La fase de plata puede ablandarse o fundirse parcialmente a alta temperatura, la interfaz de las partículas de tungsteno humedecidas puede

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reorganizarse y pueden aparecer microfisuras en los límites de grano debido a la tensión térmica. La estructura del esqueleto del tungsteno permanece estable, pero las altas temperaturas a largo plazo pueden provocar el crecimiento del grano, el aumento de la porosidad y la disminución de la densidad. La retroalimentación del rendimiento se manifiesta en una reducción de la conductividad eléctrica y térmica, una reducción de la dureza debido a los cambios en los límites de grano y una menor resistencia a la corrosión debido a la oxidación térmica. Los componentes de alta temperatura deben reforzarse para su protección.

El efecto de los ambientes húmedos o corrosivos sobre la microestructura es más complejo. La fase de plata puede sufrir una ligera corrosión en un ambiente de azufre o cloruro, formando óxidos o sulfuros y defectos en la interfaz. La fase de tungsteno presenta una alta resistencia a la corrosión, pero los defectos pueden penetrar el medio corrosivo, aumentar la porosidad y dañar la integridad estructural. La retroalimentación del rendimiento se manifiesta como una disminución de la conductividad, un mayor debilitamiento de la resistencia a la corrosión y una posible reducción de la resistencia mecánica debido a la propagación de grietas, que debe mejorarse mediante el recubrimiento superficial o el diseño de sellado. Los ambientes sometidos a tensiones mecánicas, como la vibración o el impacto, provocan cambios dinámicos en la microestructura. Los límites de grano están sujetos a la concentración de tensiones, las microfisuras pueden expandirse y los poros se convierten en puntos de liberación de tensiones, lo que afecta la densidad. La ductilidad de la fase de plata absorbe parte de la tensión, pero la carga a largo plazo puede causar daños por fatiga. La retroalimentación del rendimiento se manifiesta como una disminución de la tenacidad, un debilitamiento local de la dureza y una limitación de la conductividad eléctrica y térmica debido al daño microestructural. Es necesario optimizar la distribución del grano para aplicaciones dinámicas.

Los efectos combinados de los factores ambientales influyen en el rendimiento a través de la evolución microestructural. Las observaciones muestran que las altas temperaturas y la corrosión actúan conjuntamente para acelerar el crecimiento de defectos, y la tensión mecánica intensifica la propagación de grietas. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de recubrimientos resistentes al medio ambiente o la mejora de la estabilidad local mediante el diseño de gradientes funcionales. El impacto del entorno de servicio en la microestructura y su retroalimentación del rendimiento proporcionan una guía importante para el diseño adaptativo de aleaciones.

3.4 Métodos para controlar la microestructura de la aleación de plata y tungsteno

La regulación de la microestructura de las aleaciones de plata-tungsteno es clave para mejorar el rendimiento y adaptarse a los requisitos de la aplicación. Esto se logra mediante una combinación de preparación del material, optimización del proceso y posprocesamiento. La regulación mide la morfología del grano objetivo, la distribución de fases, la porosidad y los defectos, con el objetivo de optimizar la conductividad eléctrica y térmica, la dureza y la resistencia a la corrosión. La selección de la materia prima es fundamental para la regulación. Se utilizan polvos de tungsteno y plata a escala nanométrica de alta pureza para refinar los granos y mejorar la uniformidad de la distribución de fases.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los procesos de mezcla de polvos, como la molienda de bolas de alta energía, garantizan la uniformidad de las materias primas y reducen los defectos iniciales, sentando las bases para la regulación posterior.

El proceso de sinterización es fundamental para la regulación. La sinterización en fase líquida rellena huecos y reduce la porosidad mediante el efecto humectante de la plata. La sinterización por plasma de chispa (SPS) inhibe el crecimiento de grano y optimiza la distribución de fases mediante calentamiento y presurización rápidos. El prensado isostático en caliente (HIP) comprime los defectos y aumenta la densidad mediante alta presión. Las atmósferas de sinterización, como el vacío o un gas inerte, reducen las impurezas oxidadas y mejoran la calidad de la interfaz. El tratamiento térmico proporciona una regulación dinámica. El recocido mejora la unión de la interfaz, el temple refina los granos y el tratamiento de envejecimiento estabiliza el estado de la fase y ajusta los límites de grano y los estados de los defectos. La optimización de parámetros, como el aumento gradual de la temperatura, controla el crecimiento de grano y mejora la consistencia del rendimiento. El tratamiento superficial mejora la regulación. El pulido electroquímico reduce la rugosidad y los puntos de inicio de defectos. Los recubrimientos anticorrosivos, como los medios de aislamiento de nitruro de titanio y los recubrimientos antiadherentes, mejoran las propiedades superficiales. El diseño de gradiente funcional ajusta la composición en áreas específicas para optimizar el rendimiento local. La gestión ambiental facilita la regulación. Controle la temperatura y la humedad durante el uso para reducir los efectos de la corrosión. La tecnología de monitoreo inteligente ajusta los parámetros del proceso en tiempo real y optimiza dinámicamente la microestructura. La aplicación integral de medidas de control mejora el rendimiento de la aleación de plata-tungsteno para satisfacer las necesidades de las industrias eléctrica, de soldadura y aeroespacial.

3.4.1 Método de control de la microestructura basado en el proceso de preparación

El método de control de microestructura basado en el proceso de preparación es el medio principal para optimizar el rendimiento de la aleación de plata-tungsteno. El control preciso de la morfología del grano, la distribución de fases y los defectos se logra a través de varias etapas del proceso de pulvimetalurgia. El proceso de preparación incluye la mezcla de polvo, el prensado, la sinterización y el posprocesamiento, y cada paso tiene un efecto único en la microestructura. La dispersión uniforme de las materias primas se logra mediante la tecnología de molienda de bolas de alta energía en la etapa de mezcla de polvo. Se utilizan polvo de tungsteno y polvo de plata a escala nanométrica para refinar los granos y optimizar la consistencia de la distribución de fases. Las materias primas de alta pureza reducen las impurezas y reducen la tasa inicial de defectos, sentando las bases para la regulación posterior. El proceso de prensado ajusta la disposición de las partículas controlando la presión y el diseño del molde, reduce el espacio y mejora el nivel primario de densidad.

El proceso de sinterización es un elemento clave en la regulación. La sinterización en fase líquida aprovecha el bajo punto de fusión de la plata para humedecer las partículas de tungsteno, rellenar huecos y reducir la porosidad. La sinterización por plasma de chispa (SPS) inhibe el crecimiento del grano, refina la estructura y optimiza la distribución de fases mediante corriente pulsada y calentamiento rápido. El prensado isostático en caliente comprime los defectos mediante alta presión omnidireccional, mejora

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la unión interfacial y mejora significativamente la densidad. Las atmósferas de sinterización, como el vacío o los gases inertes, reducen la oxidación, mantienen la pureza del tungsteno y la plata y mejoran la calidad de la microestructura. El postratamiento optimiza aún más la estructura. Los tratamientos térmicos, como el recocido, mejoran la unión interfacial, el temple refina los granos y el envejecimiento estabiliza el estado de la fase. Los tratamientos superficiales, como el pulido electroquímico, reducen la rugosidad y los puntos iniciales de los defectos. El ajuste preciso de los parámetros del proceso, como el gradiente de temperatura y el control del tiempo, personaliza la microestructura para los diferentes requisitos de la aplicación. Las observaciones muestran que la ruta de proceso de SPS combinada con HIP mejora significativamente la densidad y la uniformidad, y es adecuada para contactos de alto rendimiento.

3.4.2 Optimización de la microestructura mediante la adición de elementos de aleación

La adición de elementos de aleación es un medio importante para optimizar la microestructura de las aleaciones de plata-tungsteno. Al introducir oligoelementos para ajustar el estado de fase, el límite de grano y el estado de defectos, se mejoran la conductividad eléctrica, la conductividad térmica y las propiedades mecánicas. El tipo y el contenido de los elementos añadidos deben controlarse con precisión según el rendimiento deseado para evitar efectos negativos.

La adición de níquel mejora la microestructura de la aleación de plata y tungsteno. Una pequeña cantidad de níquel (generalmente menos de un pequeño porcentaje) mejora la capacidad de humectación de la fase de plata, promueve la sinterización en fase líquida, rellena los poros y reduce la densidad de defectos. El níquel también mejora la unión interfacial, refina los granos y aumenta la dureza y la tenacidad, pero cantidades excesivas pueden introducir magnetismo y afectar la conductividad. Las observaciones muestran que la interfaz de la aleación optimizada con níquel es más densa y adecuada para aplicaciones que requieren alta resistencia. La adición de cobalto optimiza la distribución de fases. El cobalto forma una capa de interfaz estable con la plata y el tungsteno, reduce las microfisuras y mejora los efectos de refuerzo del límite de grano. El cobalto también mejora la uniformidad de las partículas de tungsteno, reduce la porosidad y mejora la conductividad térmica y la resistencia a la corrosión. El contenido debe controlarse a un nivel bajo para evitar un endurecimiento excesivo y una menor tenacidad. Los experimentos han demostrado que las aleaciones con adiciones de cobalto tienen un buen rendimiento en entornos de alta temperatura y son adecuadas para electrodos de soldadura. Otros elementos, como el molibdeno o el cromo, también pueden optimizar la microestructura. El molibdeno mejora la resistencia a la oxidación del tungsteno, reduce los defectos en el tratamiento térmico y mejora la resistencia a la corrosión. El cromo mejora la estabilidad química de la fase de plata, reduce la sensibilidad a la corrosión y optimiza la distribución de fases. La cantidad añadida debe ajustarse con precisión para evitar la fragilización de los límites de grano o un desequilibrio en el rendimiento. Los resultados muestran que la adición de oligoelementos refina los granos y mejora la uniformidad microestructural.

El efecto de los elementos de aleación se amplifica mediante el proceso de sinterización. El tratamiento a alta temperatura promueve la difusión de los elementos, optimiza la unión de la interfaz y el envejecimiento a baja temperatura estabiliza el estado de la fase. El efecto sinérgico de los elementos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

añadidos mejora la calidad de la microestructura y es adecuado para requisitos específicos de la aplicación. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de nuevas combinaciones de elementos de aleación o la determinación de la mejor proporción de adición mediante análisis inteligente. La adición de elementos de aleación contribuye directamente a la mejora del rendimiento de las aleaciones de plata-tungsteno mediante la optimización microestructural.

3.4.3 Relación entre la regulación de la microestructura y la personalización del rendimiento

Existe una estrecha relación entre la regulación de la microestructura y la personalización del rendimiento. Los ajustes en la morfología del grano, la distribución de fases y los defectos afectan directamente la conductividad eléctrica, la conductividad térmica, la dureza, la resistencia a la corrosión y la tenacidad, satisfaciendo así las necesidades de diferentes escenarios de aplicación. Esta correlación proporciona flexibilidad para el diseño de materiales, y la optimización de los procesos y la adición de elementos es clave para lograr la personalización. La regulación de la morfología del grano afecta a las propiedades mecánicas. El refinamiento de los granos mejora la dureza y la resistencia mediante el refuerzo de los límites de grano, lo cual resulta adecuado para contactos con alta resistencia al desgaste. El ajuste de la orientación del grano reduce la concentración de tensiones y mejora la tenacidad, lo cual resulta adecuado para entornos de carga dinámica. Las observaciones muestran que las aleaciones con granos nanométricos ofrecen un buen rendimiento en contrapesos aeroespaciales. La optimización de la distribución de fases determina las propiedades eléctricas. La continuidad de la red de fases de plata mejora la conductividad eléctrica y térmica, lo cual resulta adecuado para contactos de interruptores automáticos de alta tensión. La distribución uniforme de las fases de tungsteno mejora la estabilidad estructural y equilibra el rendimiento a alta temperatura, lo cual resulta adecuado para electrodos de soldadura. El diseño de gradiente funcional agrega fases de plata al área conductora para personalizar las necesidades de disipación de calor de la electrónica.

El control de defectos y porosidad mejora el rendimiento general. La reducción de la porosidad mejora la densidad, la resistencia a la corrosión y la conductividad, y es adecuada para equipos industriales. La reducción de microfisuras mejora la resistencia a la fatiga y cumple con los requisitos de servicio a largo plazo. La optimización de procesos, como la combinación de HIP y SPS, permite lograr estructuras con bajos niveles de defectos y componentes personalizados de alta fiabilidad. La adición de elementos de aleación facilita aún más la personalización. El níquel y el cobalto refinan los límites de grano, mejoran la dureza y la resistencia a la corrosión, y personalizan las aplicaciones resistentes al desgaste. El molibdeno y el cromo optimizan la resistencia a la oxidación para satisfacer las necesidades de entornos de alta temperatura. El ajuste dinámico de las proporciones de los elementos personaliza la microestructura según el escenario de aplicación, y las observaciones demuestran que las aleaciones personalizadas superan a los materiales de uso general en propiedades específicas. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de herramientas de diseño inteligente para predecir el efecto de la regulación o la verificación de soluciones personalizadas mediante experimentos multiparamétricos. La conexión entre la regulación de la microestructura y la personalización del rendimiento proporciona soporte adaptativo para las aleaciones de plata-tungsteno, satisfaciendo así las diversas necesidades de los sectores eléctrico, de soldadura y aeroespacial.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 4: Tecnología de preparación de aleación de plata y tungsteno

El proceso de preparación de la aleación de plata-tungsteno es clave para su microestructura y rendimiento. La pulvimetalurgia es la principal tecnología de producción, que permite la preparación de aleaciones de alto rendimiento mediante el control preciso de los procesos de procesamiento de la materia prima, moldeo y sinterización. Este proceso combina la alta conductividad de la plata con la alta dureza del tungsteno para satisfacer los requisitos de aplicación de contactos eléctricos, electrodos de soldadura y componentes aeroespaciales.

4.1 Producción de aleación de plata y tungsteno mediante pulvimetalurgia

La pulvimetalurgia es un método de producción eficiente y controlable para preparar aleaciones de plata y tungsteno mediante la mezcla, prensado y sinterización de polvos de plata y tungsteno. Este método aprovecha al máximo el bajo punto de fusión de la plata y el alto punto de fusión del tungsteno para formar una estructura densa mediante sinterización en fase líquida. El proceso incluye la preparación, mezcla, prensado y sinterización del polvo, así como el posterior tratamiento térmico y de superficie para optimizar aún más el rendimiento. La pulvimetalurgia es adecuada para la producción en masa, especialmente para aplicaciones que requieren alta densidad y uniformidad.

4.1.1 Proceso de preparación del polvo y puntos clave

La preparación de polvos es la base de la pulvimetalurgia, que implica la adquisición, purificación y control del tamaño de partícula de los polvos de plata y tungsteno, lo cual afecta directamente la microestructura y las propiedades de la aleación. El proceso incluye la selección de la materia prima, el triturado, el cribado y el tratamiento superficial, y cada paso requiere atención a los puntos clave.

La selección de la materia prima considera primero la alta pureza de la plata y el tungsteno, y utiliza polvo metálico de alta calidad para reducir la introducción de impurezas. El polvo de plata se prepara generalmente por precipitación química o atomización, mientras que el polvo de tungsteno se obtiene a partir del óxido de tungsteno por reducción de hidrógeno para garantizar una composición química estable. A mayor pureza, mejor conductividad y resistencia a la corrosión de la aleación preparada.

El tamaño de partícula del polvo se refina mediante molienda de bolas o molienda por flujo de aire. El polvo de tungsteno debe triturarse desde partículas gruesas hasta niveles submicrónicos o nanométricos, y el polvo de plata se controla a un tamaño de partícula adecuado para su posterior mezcla. La tecnología de molienda de bolas de alta energía puede mejorar la uniformidad, pero debe evitarse el sobrecalentamiento, ya que podría causar aglomeración del polvo. El control de la distribución del tamaño de partícula es fundamental. Las partículas demasiado grandes pueden causar poros, mientras que las partículas demasiado pequeñas aumentan la energía superficial y afectan la sinterización.

El tamizado garantiza la consistencia del tamaño de las partículas de polvo. Se utilizan tamices estándar para eliminar partículas de mayor o menor tamaño y optimizar el efecto de la mezcla. La uniformidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del tamaño de las partículas afecta directamente la distribución de las fases. Las partículas finas contribuyen a la formación de una estructura densa, pero es necesario equilibrar la fluidez para la compresión. El tratamiento superficial elimina las capas de óxido y las impurezas mediante limpieza química o recubrimiento para mejorar la compresibilidad y las propiedades de sinterización del polvo. El óxido de plata puede formarse en la superficie del polvo de plata y debe tratarse con un agente reductor; el óxido de la superficie del polvo de tungsteno se elimina mediante lavado ácido. El polvo tratado debe almacenarse en un ambiente seco para evitar la absorción de humedad y la oxidación.

Los puntos clave incluyen el control de la pureza del polvo, el tamaño de partícula y el estado de la superficie, así como el uso de equipos avanzados como el molino de bolas de plasma para mejorar la eficiencia. La optimización de la preparación del polvo sienta las bases para los procesos posteriores y está directamente relacionada con la calidad microestructural de la aleación.

4.1.2 Principio y funcionamiento del proceso de prensado

El proceso de prensado es el paso clave para formar un cuerpo verde a partir de polvo mixto de plata y tungsteno. Se basa en el principio de compresión y densificación de las partículas de polvo bajo presión, lo que afecta directamente la densidad del cuerpo verde y el efecto de sinterización posterior. La operación debe centrarse en el control de la presión, el diseño del molde y los parámetros del proceso para garantizar la calidad del moldeo. El principio de prensado se basa en la deformación plástica y el deslizamiento de las partículas de polvo bajo presión externa, rellenando los huecos moleculares y reduciendo la porosidad. El polvo de plata es fácil de comprimir gracias a su buena ductilidad, mientras que el polvo de tungsteno requiere mayor presión debido a su alta dureza. El polvo mixto se somete a fuerza en el molde, las partículas se reorganizan y la densidad inicial mejora gradualmente. La uniformidad de la distribución de la presión es fundamental. La sobrepresión local puede causar grietas, mientras que la subpresión retiene más poros.

El proceso incluye el llenado de polvo, el preprensado y el prensado principal. Al llenar el polvo, asegúrese de que llene el molde uniformemente para evitar la estratificación o la formación de huecos. La vibración o el golpeteo pueden facilitar la distribución. El preprensado aplica baja presión para expulsar el aire y mejorar el contacto entre las partículas. El prensado principal utiliza una prensa hidráulica o mecánica. La presión se ajusta según la composición de la aleación. Cuando el contenido de tungsteno es alto, debe aumentarse a un nivel superior. El valor típico es de cientos de MPa. El tiempo de prensado se controla desde unos pocos segundos hasta decenas de segundos. Si es demasiado largo, puede causar rebote elástico.

El diseño del molde es clave para su funcionamiento. Se utilizan materiales resistentes al desgaste, como el carburo cementado, para fabricar moldes con paredes internas lisas que reducen la fricción. La forma del molde se personaliza según los requisitos de la pieza final, y las formas complejas requieren prensado por secciones. Se aplican lubricantes, como el estearato de zinc, a la pared interna del molde para reducir la fricción, mejorar la densidad de la pieza y las propiedades de desmoldeo. La optimización de los parámetros del proceso incluye el gradiente de presión, la velocidad de prensado y la temperatura. La

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

presurización gradual reduce la concentración de tensiones, el prensado lento mejora la densidad y el calentamiento moderado mejora la fluidez del polvo. Las observaciones muestran que el cuerpo verde con un proceso de prensado optimizado presenta una menor porosidad y una mejor planitud superficial, lo que sienta las bases para la sinterización. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de un sistema de prensado inteligente para monitorear la presión en tiempo real o el uso de tecnología de prensado isostático para mejorar la uniformidad. El principio y el funcionamiento del proceso de prensado permiten obtener piezas en bruto de alta calidad mediante un control preciso, lo que mejora directamente el rendimiento de la aleación de plata y tungsteno.

4.1.3 Control e influencia del proceso de sinterización

El proceso de sinterización es una etapa clave en la producción de aleaciones de plata-tungsteno mediante pulvimetalurgia. La unión y la densificación de las partículas de polvo se logran mediante un tratamiento a alta temperatura, lo que afecta directamente la microestructura y el rendimiento. El control de la temperatura, el tiempo y la atmósfera de sinterización es fundamental, y la optimización de los parámetros del proceso está estrechamente relacionada con la porosidad, la distribución de fases y las propiedades mecánicas de la aleación.

El proceso de sinterización se basa en el principio de sinterización en fase líquida. La plata se funde a alta temperatura, humedece las partículas de tungsteno, rellena los huecos y mejora la resistencia de la unión de la interfaz. El control de la temperatura es fundamental. Si la temperatura es demasiado baja, la plata no se puede fundir completamente y la porosidad es alta; si la temperatura es demasiado alta, las partículas de tungsteno pueden crecer o la plata puede volatilizarse, afectando la uniformidad. La temperatura de sinterización típica se ajusta en función de la relación plata-tungsteno, que suele ser ligeramente superior al punto de fusión de la plata, y se mantiene durante un tiempo para promover la difusión. El control del tiempo afecta el crecimiento y la densificación del grano. La sinterización a corto plazo limita el crecimiento del grano y mantiene una estructura fina, pero puede dejar poros; la sinterización a largo plazo promueve la unión de las partículas y reduce los defectos, pero puede provocar un crecimiento anormal. Optimizar el tiempo requiere un equilibrio entre la densidad y el tamaño del grano. Las observaciones muestran que la sinterización a medio plazo permite lograr la mejor microestructura.

El control de la atmósfera previene la oxidación y la introducción de impurezas. Un entorno de vacío o con cianuro de alta pureza reduce la oxidación superficial de la plata y el tungsteno y mantiene la pureza. Las atmósferas inertes, como el argón, también son eficaces para evitar que las reacciones químicas afecten la distribución de fases. La estabilidad de la atmósfera de sinterización afecta directamente la conductividad y la resistencia a la corrosión, por lo que controlar la pureza de la atmósfera es un paso importante.

La influencia del proceso de sinterización se refleja en la microestructura. Los parámetros adecuados forman una estructura densa, reducen la porosidad y mejoran la dureza y la conductividad; los parámetros inadecuados pueden causar microfisuras o una distribución desigual de las fases, lo que reduce el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rendimiento. El prensado isostático en caliente (HIP) o la sinterización por plasma de chispa (SPS) se utilizan como medios auxiliares para optimizar aún más el efecto de sinterización. El SPS acelera la difusión mediante corriente pulsada, y el HIP comprime los defectos mediante alta presión. Las direcciones de optimización incluyen el desarrollo de hornos de sinterización inteligentes para monitorear la temperatura y la atmósfera en tiempo real, o la combinación de sinterización multietapa para mejorar la precisión del control. El control y la influencia del proceso de sinterización moldean directamente el rendimiento de la aleación de plata-tungsteno a través de la optimización de parámetros.

4.2 Producción de aleación de plata y tungsteno mediante el método de infiltración al vacío

Fundir plata al vacío e infiltrarla en un esqueleto poroso de tungsteno. Este método es adecuado para preparar formas complejas o componentes de alto rendimiento, y es especialmente adecuado para aplicaciones que requieren excelente conductividad y resistencia a altas temperaturas. El proceso incluye la preparación del esqueleto de tungsteno, la infiltración y el posprocesamiento, y el control preciso de los equipos y parámetros es clave para el éxito.

4.2.1 Principio de infiltración y requisitos del equipo

El principio de infiltración se basa en la acción capilar y la penetración del metal líquido en un entorno de vacío. El esqueleto poroso de tungsteno se infiltra mediante la fusión de plata para formar una aleación densa. La plata se licua a alta temperatura, reduce la oxidación en condiciones de vacío y se vale de la fuerza capilar para penetrar en los poros del esqueleto de tungsteno, rellenar los huecos y combinarse con el tungsteno.

La acción capilar es el mecanismo principal, y el tamaño y la distribución de los poros del esqueleto de tungsteno determinan la eficiencia de penetración. La humectabilidad del líquido de plata afecta directamente la profundidad de penetración, y la tensión superficial debe coincidir con las características de los poros. El entorno de vacío reduce la obstrucción por gas, previene la oxidación o volatilización de la plata y garantiza una penetración pura.

Los requisitos del equipo incluyen un horno de vacío, un sistema de calentamiento y un dispositivo de control de presión. El horno de vacío debe alcanzar un alto grado de vacío para evitar que el gas residual afecte la penetración y estar equipado con un sensor de presión preciso. El sistema de calentamiento utiliza calentamiento por inducción o resistencia, con alta uniformidad de temperatura y un rango de control que cubre temperaturas superiores al punto de fusión de la plata. El dispositivo de control de presión facilita la penetración y ajusta la presión externa para mejorar el flujo de plata líquida.

El diseño del molde admite formas complejas, está fabricado con materiales resistentes a altas temperaturas, como grafito o cerámica, y cuenta con una pared interior lisa para reducir la adherencia. El sistema de monitoreo de temperatura y vacío ajusta los parámetros en tiempo real para garantizar una penetración estable. El mantenimiento del equipo es fundamental, y se requieren inspecciones periódicas de los elementos de sellado y calentamiento para evitar fugas o la degradación del rendimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2.2 Pasos del proceso y optimización de parámetros

Las etapas del proceso de infiltración al vacío incluyen la preparación del esqueleto de tungsteno, la fusión de la plata y el postratamiento de la infiltración. Es necesario optimizar los parámetros en cada etapa para lograr la mejor microestructura y rendimiento. El esqueleto de tungsteno se prepara prensando el polvo y sinterizándolo para formar una estructura porosa. Tras mezclar el polvo de tungsteno, se prensa para darle forma. La temperatura de sinterización es inferior al punto de fusión de la plata para mantener una porosidad moderada. El tamaño y la distribución de los poros deben ser uniformes. Unos poros demasiado grandes pueden provocar una penetración insuficiente de la plata, mientras que unos poros demasiado pequeños dificultan el flujo. Las observaciones demuestran que el esqueleto de tungsteno con sinterización optimizada ofrece el mejor efecto de penetración.

La fusión de plata se lleva a cabo en un horno de vacío. La plata se coloca sobre el esqueleto de tungsteno y se calienta por encima del punto de fusión para formar plata líquida. El control de temperatura es para evitar el sobrecalentamiento, que puede causar la volatilización de la plata o la deformación del esqueleto de tungsteno. El grado de vacío se mantiene a un nivel alto para reducir las impurezas oxidadas y mejorar la humectabilidad. El tiempo de fusión se ajusta según el espesor del esqueleto para asegurar la licuefacción completa. El proceso de penetración se basa en la fuerza capilar y la presión auxiliar. El líquido de plata penetra en el esqueleto de tungsteno en condiciones de vacío, y el tiempo y la presión deben coincidir. Demasiado corto puede dejar poros, y demasiado largo hará que la plata se desborde. La presión auxiliar mejora la profundidad de penetración y el exceso de plata se elimina antes del posprocesamiento de optimización. La observación muestra que la capa de penetración después de la optimización de parámetros es uniforme y densa.

El posprocesamiento incluye enfriamiento y tratamiento térmico. El enfriamiento lento reduce la tensión térmica, y el tratamiento térmico, como el recocido, mejora la unión de la interfaz y la consistencia del rendimiento. La optimización de los parámetros debe ajustarse según los requisitos del componente, y las formas complejas pueden requerir infiltración segmentada.

4.2.3 Ventajas y limitaciones de este proceso

El método de infiltración al vacío presenta ventajas únicas en la producción de aleaciones de plata y tungsteno, pero también presenta ciertas limitaciones que afectan directamente sus aplicaciones y la optimización de procesos. La ventaja radica en su capacidad para alcanzar una alta densidad. El líquido de plata penetra completamente el esqueleto de tungsteno en condiciones de vacío, reduciendo la porosidad y mejorando la conductividad eléctrica y térmica de la aleación. Es especialmente adecuado para contactos y electrodos que requieren un rendimiento uniforme. La preparación de piezas con formas complejas es otra ventaja. El método de infiltración se adapta a estructuras porosas mediante capilaridad y facilita la formación de piezas de precisión como contrapesos aeroespaciales o conectores electrónicos. El entorno de vacío también reduce las impurezas oxidativas, mantiene la pureza de la plata y el tungsteno, y mejora la resistencia a la corrosión y la estabilidad a largo plazo. Las limitaciones se reflejan principalmente en la complejidad del proceso y su elevado coste. El mantenimiento del horno de vacío

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y el equipo de calentamiento es elevado, y la inversión inicial y los costes operativos aumentan, lo que limita la capacidad de producción a gran escala. La porosidad del esqueleto de tungsteno y la profundidad de penetración de la plata deben ajustarse con precisión, el control de parámetros es difícil y la tasa de fallos puede ser alta. La volatilización o el desbordamiento de plata a altas temperaturas pueden generar desperdicio de material y afectar a la economía. Además, el método de infiltración por fusión tiene requisitos estrictos en cuanto a la pureza y el tamaño de partícula de las materias primas, y el proceso de preparación de esqueletos de tungsteno porosos es complejo, lo que dificulta la operación. Las observaciones microestructurales muestran que una optimización insuficiente puede provocar interfaces irregulares y afectar la consistencia del rendimiento.

4.3 Comparación de procesos y base de selección

Los procesos de preparación de aleaciones de plata-tungsteno incluyen la pulvimetalurgia y la infiltración al vacío. Cada método presenta diferencias en rendimiento, costo y aplicabilidad. La selección del proceso debe considerarse exhaustivamente en función de los requisitos de la aplicación y las condiciones de producción.

4.3.1 Análisis de costos de diferentes procesos

El costo es un factor clave para la selección de procesos. La diferencia de costo entre la pulvimetalurgia y la infiltración al vacío se refleja principalmente en la inversión en equipos, el consumo de materia prima y la eficiencia de producción, lo que afecta directamente la economía de producción. El análisis de costos debe evaluarse en conjunto con la producción por lotes y los requisitos de calidad.

El costo de los equipos para la pulvimetalurgia es relativamente bajo. La prensa de polvo y el horno de sinterización son equipos básicos con una estructura simple y un bajo costo de mantenimiento, ideales para la producción en masa. El consumo de materia prima es principalmente polvo de plata y polvo de tungsteno. El proceso de mezcla y prensado de polvos tiene una alta tasa de utilización de material y genera poco desperdicio. La eficiencia de producción es alta, el grado de automatización se puede mejorar mediante la línea de ensamblaje y el costo unitario disminuye con el aumento de la producción. Las observaciones muestran que el costo de la producción a pequeña escala es moderado y el costo de la producción a gran escala se reduce significativamente, lo cual es adecuado para piezas estandarizadas como contactos y electrodos.

El costo del equipo del método de infiltración al vacío es relativamente alto. El horno de vacío, el sistema de calentamiento por inducción y el dispositivo de control de presión requieren una fabricación precisa, y la inversión inicial y los costos de mantenimiento son elevados, lo que limita la producción a pequeña y mediana escala. El consumo de materia prima incluye polvo de tungsteno para preparar esqueletos porosos y plata. Los procesos de sinterización de esqueletos y fusión de plata pueden causar pérdida de material, y su eficiencia es inferior a la de la pulvimetalurgia. La eficiencia de la producción se ve limitada por la complejidad del proceso; el ajuste de parámetros y el control de calidad aumentan los costos de mano de obra, y el costo unitario es relativamente alto. Las observaciones muestran que el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

costo de producción de piezas de alto rendimiento o de formas complejas es aceptable, pero la rentabilidad no es suficiente para aplicaciones a gran escala.

Los costos de mano de obra y el consumo de energía también afectan el costo total. La pulvimetalurgia cuenta con un flujo de proceso estandarizado y una baja demanda de mano de obra. El consumo de energía se concentra principalmente en la etapa de sinterización, que puede reducirse optimizando la temperatura. La infiltración al vacío requiere operadores profesionales, y el proceso de vacío y calentamiento a largo plazo consume mucha energía, lo que requiere una gestión energética eficiente. El análisis de costos muestra que la pulvimetalurgia ofrece mayores ventajas en el control de costos y es adecuada para necesidades de alta producción; la infiltración al vacío es más competitiva en componentes de alto valor añadido.

Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de equipos de vacío de bajo costo o la mejora de la eficiencia de la pulvimetalurgia mediante la integración de procesos. El análisis de costos proporciona una base cuantitativa para la selección del proceso, que debe ponderarse según la escala de producción y los requisitos de rendimiento.

4.3.2 Diferencias de rendimiento y selección de procesos

Las diferencias de rendimiento son un factor importante a la hora de elegir entre pulvimetalurgia o infiltración al vacío. Ambos procesos presentan características diferentes en cuanto a conductividad, conductividad térmica, dureza, resistencia a la corrosión y consistencia microestructural, lo cual influye directamente en los escenarios de aplicación.

La aleación de plata y tungsteno preparada mediante pulvimetalurgia presenta una conductividad eléctrica y térmica estable. La fase de plata forma una red continua mediante sinterización en fase líquida, con una alta eficiencia de transferencia de corriente y calor, ideal para contactos de interruptores de alta tensión y sustratos de disipación de calor. Su alta dureza se debe a la buena distribución y densidad de las partículas de tungsteno, y su resistencia al desgaste cumple con los requisitos de los electrodos de soldadura. La resistencia a la corrosión depende del control de la atmósfera de sinterización y, tras la optimización, presenta un buen rendimiento en ambientes húmedos. La consistencia de la microestructura se ve afectada por la uniformidad de la mezcla y el prensado del polvo. Los procesos adecuados reducen los defectos y son adecuados para la producción estandarizada a gran escala.

La aleación preparada mediante infiltración al vacío ofrece mayores ventajas en rendimiento. La plata líquida se infiltra en el esqueleto de tungsteno para formar una estructura de alta densidad con una porosidad extremadamente baja. Su conductividad eléctrica y térmica es superior a la de la pulvimetalurgia, lo que la hace especialmente adecuada para conectores electrónicos de alta precisión. La dureza es mayor gracias a la mayor densidad y fuerza de unión de la interfaz, y la resistencia al desgaste y al arco eléctrico son excepcionales, lo que resulta adecuado para piezas pulverizadas con plasma. La resistencia a la corrosión mejora gracias a la reducción de la oxidación en el entorno de vacío, y la vida útil es más larga en entornos corrosivos. La consistencia de la microestructura es excelente y la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

uniformidad de las piezas de formas complejas es mejor, lo que resulta adecuado para contrapesos aeroespaciales.

La diferencia de rendimiento se debe al mecanismo del proceso. La pulvimetalurgia se basa en la uniformidad de la mezcla de polvos y los parámetros de sinterización, y su rendimiento es estable, pero el margen de optimización es limitado. El método de infiltración al vacío logra una alta densidad mediante penetración capilar y tiene un mayor potencial de rendimiento, pero es sensible a los parámetros. Las observaciones muestran que la pulvimetalurgia es adecuada para aplicaciones generales que requieren un equilibrio entre coste y rendimiento, mientras que la infiltración es adecuada para aplicaciones de alto rendimiento o necesidades personalizadas. La selección del proceso debe determinarse en función de la prioridad de conductividad, los requisitos de resistencia a la corrosión y la complejidad de los componentes. Las directrices de optimización incluyen la combinación de las ventajas del proceso para mejorar el rendimiento.

4.3.3 Eficiencia de producción y adaptación de procesos

La eficiencia de producción y la adaptación del proceso son dimensiones importantes para la selección. La pulvimetalurgia y la infiltración al vacío difieren en rendimiento, grado de automatización y utilización de equipos, lo cual afecta directamente el ciclo de producción y los beneficios económicos.

La pulvimetalurgia ofrece una alta eficiencia de producción. Los procesos de mezcla, prensado y sinterización de polvos pueden automatizarse, y la producción en cadena permite aumentar la producción, lo que resulta ideal para la producción en masa de contactos y electrodos. La tasa de utilización de los equipos es alta, y la prensa de polvos y el horno de sinterización pueden operar de forma continua con breves paradas por mantenimiento. El ciclo de producción es corto, generalmente de pocas horas desde la materia prima hasta el producto terminado, lo que resulta ideal para escenarios que requieren una respuesta rápida a la demanda del mercado. El proceso presenta una gran adaptabilidad, y los moldes y parámetros estándar se adaptan a diversas especificaciones, con gran flexibilidad. El método de infiltración al vacío presenta una baja eficiencia de producción. El proceso de preparación e infiltración del esqueleto de tungsteno requiere un control preciso, su grado de automatización es limitado y su producción es adecuada para lotes pequeños y medianos de piezas de alto valor añadido, como contrapesos de aviación. La utilización del equipo se ve afectada por la complejidad del horno de vacío, y el mantenimiento y el ajuste de parámetros aumentan el tiempo de inactividad. El ciclo de producción es largo y el tiempo total de preparación e infiltración del esqueleto puede ser de varios días, lo cual es adecuado para la personalización o para requisitos de alto rendimiento. La adaptabilidad del proceso depende del diseño del molde y del esqueleto, y las formas complejas requieren equipos especiales, con una flexibilidad limitada.

La diferencia en eficiencia radica en la complejidad del proceso. El proceso de pulvimetalurgia está estandarizado y es adecuado para altos rendimientos; el método de infiltración al vacío ofrece un proceso preciso y es adecuado para altos requisitos de calidad. Las observaciones muestran que el método de pulvimetalurgia presenta claras ventajas de eficiencia en la producción en masa, y el método de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

infiltración es más adaptable a la producción de alta precisión en lotes pequeños. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de equipos de infiltración automatizados o la optimización de los parámetros de pulvimetalurgia para acortar el ciclo. La eficiencia de producción y la adaptación del proceso proporcionan una base práctica para la selección, que debe sopesarse en función de los objetivos de producción y los requisitos de calidad.



CTIA GROUP LTD Aleación de tungsteno y plata

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD
Silver Tungsten Alloy Introduction

1. Overview of Silver Tungsten Alloy

Silver tungsten alloy is an alloy material primarily composed of silver and tungsten, where silver serves as the matrix or binding phase and tungsten acts as the high-melting-point reinforcing phase, combining the advantages of both to create a material with excellent performance.

2. Features of Silver Tungsten Alloy

The composition ratio of silver-tungsten alloy is adjustable; a higher silver content enhances its electrical and thermal conductivity, making it suitable for high-voltage electrical contacts, while a higher tungsten content improves its high-temperature resistance and wear resistance, making it ideal for welding electrodes and high-temperature components.

3. The Composition Ratio of Silver Tungsten Alloy

Materials	Composition (%weight)	Density (/g.cm3)	Electrical conductivity	Electrical resistivity	Hardness (HB)
AgW30	70 silver 30 tungsten	11.8-12.2	73	2.3	75
AgW40	60 silver 40 tungsten	12.5-12.8	64	2.6	85
AgW50	50 silver 50 tungsten	13.2-13.5	73-56	2.3-3.0	105
AgW55	45 silver 55 tungsten	13.6-13.9	54	3.2	115
AgW60	40 silver 60 tungsten	14.0-14.4	60-50	2.8-3.3	125
AgW65	35 silver 65 tungsten	14.5-14.9	50	3.4	135
AgW70	30 silver 70 tungsten	14.7-15.1	48	3.5	150
AgW80	20 silver 80 tungsten	16.1-16.5	37	4.5	180

4. Production Methods for Silver Tungsten Alloy

The preparation method for tungsten-silver alloy is the same as that for tungsten-copper alloy. Due to tungsten's high melting point and its inability to alloy with silver, traditional methods cannot be used. Tungsten-silver alloy is generally produced using the vacuum infiltration method, with production steps including material mixing preparation, pressing and forming, degreasing, high-temperature sintering, infiltration, and post-processing.

5. Applications of Silver Tungsten Alloy

Silver-tungsten alloy is primarily used for electrical contacts and electrode materials, such as breaker contacts, resistance welding electrodes, and plasma spray components, with its excellent electrical properties and arc resistance meeting the demands of high currents and frequent operations.

6. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: silver-tungsten.net

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Capítulo 5: Pruebas de rendimiento y caracterización de la aleación de plata y tungsteno

Las pruebas de rendimiento y la caracterización de [la aleación de plata-tungsteno](#) son un paso clave para evaluar su calidad y potencial de aplicación. Mediante pruebas sistemáticas de las propiedades físicas, mecánicas y funcionales, se revela el rendimiento de la aleación en términos de conductividad eléctrica, conductividad térmica, dureza y resistencia a la corrosión. El método de prueba debe combinarse con las normas internacionales y las condiciones experimentales para garantizar la fiabilidad y comparabilidad de los datos.

5.1 Prueba de propiedades físicas de la aleación de plata y tungsteno

El ensayo de propiedades físicas de la aleación de plata y tungsteno se centra en propiedades básicas como la densidad, la dureza y la conductividad. Estos indicadores reflejan directamente la microestructura y el proceso de preparación de la aleación. La medición precisa de las propiedades físicas proporciona la base para posteriores ensayos de rendimiento mecánico y funcional. El método de ensayo debe optimizarse según las características de la aleación.

5.1.1 Método de prueba de densidad

La prueba de densidad es un método importante para evaluar la densidad y la porosidad de las aleaciones de plata y tungsteno, ya que refleja la distribución de plata y tungsteno en el material y la calidad de la sinterización. La densidad afecta directamente la conductividad eléctrica, la conductividad térmica y la resistencia mecánica, por lo que el método de prueba debe garantizar la precisión y la repetibilidad.

El método de Arquímedes es un método de prueba de densidad comúnmente utilizado. La muestra se pesa primero en seco para obtener su peso seco. A continuación, se sumerge en un líquido de densidad conocida (como agua destilada) para medir el peso suspendido y el peso sumergido. La densidad se calcula mediante la fórmula: $\text{Densidad} = \text{peso seco} / (\text{peso seco} - \text{peso sumergido}) \times \text{densidad del líquido}$. El líquido debe estar libre de burbujas y no debe haber poros en la superficie de la muestra que afecten la medición. Se promedian varias pruebas para asegurar resultados estables.

La fluorescencia de rayos X (XRF) se utiliza como método auxiliar para evaluar indirectamente la consistencia de la densidad mediante la combinación de análisis microscópicos para determinar la distribución de fases. La muestra se corta en láminas finas y se coloca en un dispositivo de rayos X para medir la proporción de plata y tungsteno, y la densidad real se calcula a partir de la densidad teórica. Este método es adecuado para piezas con formas complejas, y el instrumento debe calibrarse para reducir errores. Los puntos clave de la prueba incluyen el pretratamiento de la muestra, la eliminación de las capas de óxido superficial y las impurezas, y la prevención de la absorción de humedad que afecta los resultados. El entorno de prueba debe mantener una temperatura y humedad constantes para reducir las interferencias externas. Las observaciones muestran que la densidad de la aleación con un proceso de sinterización optimizado se acerca al valor teórico, presenta baja porosidad y un excelente rendimiento. La precisión del método de prueba de densidad proporciona datos fiables para la evaluación del

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rendimiento, y la optimización incluye el desarrollo de tecnología de medición sin contacto para mejorar la eficiencia.

5.1.2 Normas y operaciones de prueba de dureza

La prueba de dureza es un método importante para evaluar la resistencia a la deformación y al desgaste de las aleaciones de plata y tungsteno, lo que refleja el efecto sinérgico de las partículas de tungsteno y la fase de plata. La dureza afecta la vida útil de la aleación en contacto mecánico y en entornos de arco eléctrico. La prueba debe cumplir con las normas internacionales y estandarizar su funcionamiento.

La prueba de dureza Vickers es una norma común que cumple con las especificaciones ISO 6507 o ASTM E384. Esta prueba utiliza un indentador de diamante, que se presiona contra la superficie de la muestra bajo una carga específica, se mantiene durante un tiempo determinado y luego se retira para medir la longitud diagonal de la indentación. El valor de dureza se calcula mediante la fórmula: $HV = 1,854 \times \text{carga} / (\text{longitud diagonal}^2)$. La carga se selecciona según el espesor de la muestra, generalmente 5 kg o 10 kg, y el tiempo se controla con un margen de 10 a 15 segundos. Los pasos de la operación incluyen la preparación de la muestra, el pulido de la superficie hasta obtener un acabado de espejo y la eliminación de arañazos y defectos. Los puntos de prueba se seleccionan en un área uniforme para evitar que los poros o los límites de fase afecten los resultados. Se miden varios puntos repetidamente para cada prueba y se obtiene el promedio para reducir los errores. El equipo debe calibrarse periódicamente para garantizar la precisión del indentador y la carga.

La prueba de dureza Brinell es un método complementario, conforme a la norma ISO 6506, que utiliza un indentador de bola de acero, adecuado para muestras de mayor tamaño. La carga es mayor y la indentación es mayor, lo que refleja la dureza general, pero la planitud de la superficie es más exigente. El resultado de la prueba está relacionado con la dureza Vickers y debe seleccionarse según los requisitos de la aplicación.

Los puntos clave de la prueba incluyen la correspondencia entre la carga y el tiempo. Una carga demasiado alta puede penetrar la muestra, y un tiempo demasiado corto puede afectar la formación de indentación. La temperatura y la humedad ambiente deben ser estables para evitar afectar las propiedades del material. Las observaciones muestran que la dureza de la aleación con microestructura optimizada mejora significativamente, al igual que la resistencia al desgaste. Las normas y operaciones de las pruebas de dureza proporcionan una base cuantitativa para la evaluación del rendimiento. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de un sistema de pruebas automatizado para mejorar la eficiencia.

5.1.3 Métodos de prueba de conductividad eléctrica y conductividad térmica

Las pruebas de conductividad eléctrica y térmica son clave para evaluar la conductividad eléctrica y térmica de las aleaciones de plata y tungsteno, ya que reflejan la continuidad de la red de fases de plata y la densidad de la microestructura. La conductividad eléctrica mide la eficiencia de la transferencia de corriente, mientras que la conductividad térmica evalúa la capacidad de transferencia de calor. El método

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de prueba debe garantizar la precisión y la repetibilidad. La prueba de conductividad utiliza el método de cuatro sondas, que cumple con la norma ASTM F76. La superficie de la muestra es plana y se coloca en el soporte de prueba. Cuatro sondas se conectan a intervalos regulares. Se aplica una corriente constante y se mide la caída de tensión. La conductividad se calcula mediante la fórmula: $\sigma = L / (R \times A)$, donde L es la separación entre sondas, R es la resistencia y A es el área de la sección transversal. Los puntos de prueba se seleccionan en un área uniforme para evitar la influencia de los poros. El equipo debe calibrarse, la temperatura ambiente debe mantenerse estable y se obtiene el valor promedio después de múltiples mediciones.

La prueba de conductividad térmica utiliza el método de destello láser según la norma ASTM E1461. La muestra se corta en láminas finas, la superficie se ennegrece para absorber el láser, el pulso láser calienta un lado y el detector infrarrojo mide la curva de aumento de temperatura en el otro. La conductividad térmica se calcula mediante la difusividad térmica, el calor específico y la densidad: $\lambda = \alpha \times \rho \times C_p$, donde α es la difusividad térmica, ρ es la densidad y C_p es el calor específico. La prueba requiere controlar el espesor de la muestra y la energía del láser para reducir la influencia de la pérdida de calor.

Los puntos clave de la prueba incluyen el pretratamiento de la muestra, la eliminación de la capa de óxido superficial y la garantía de un buen contacto. La prueba de conductividad requiere el apantallamiento de las interferencias electromagnéticas, y la prueba de conductividad térmica requiere la calibración de la precisión del detector. Las observaciones muestran que la aleación sinterizada optimizada presenta mayor conductividad y conductividad térmica, siendo la densidad de la microestructura el factor clave. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de tecnología de ensayos no destructivos o la combinación de múltiples métodos para mejorar la precisión de la medición.

5.2 Evaluación de las propiedades químicas de la aleación de plata y tungsteno

La evaluación del rendimiento químico de las aleaciones de plata y tungsteno se centra en la resistencia a la corrosión y la estabilidad química, lo que refleja su capacidad de uso a largo plazo en diferentes entornos. Las pruebas de rendimiento químico deben simular condiciones de servicio reales, evaluar la resistencia a la corrosión de las fases de plata y tungsteno, y proporcionar datos fiables para su aplicación.

5.2.1 Entorno y métodos de prueba de resistencia a la corrosión

La prueba de resistencia a la corrosión evalúa la estabilidad química de la aleación de plata y tungsteno mediante la simulación de diferentes entornos. El entorno y el método de prueba deben diseñarse según el escenario de aplicación para garantizar la representatividad de los resultados. La resistencia a la corrosión refleja la capacidad de la aleación para resistir la oxidación, la sulfuración o la corrosión ácido-base, lo que afecta directamente a su vida útil. La prueba de niebla salina es un entorno común y cumple con la norma ASTM B117. La muestra se coloca en una cámara de niebla salina y se rocía con una solución de cloruro de sodio al 5%. La temperatura se controla dentro de un rango determinado durante varias horas o días. Observe los productos de corrosión superficial, como óxidos o sulfuros de plata, y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

evalúe la profundidad y el área de erosión. La prueba registra la tasa de pérdida de peso y los cambios de apariencia, y múltiples ciclos simulan la exposición a largo plazo.

La prueba de inmersión ácido-base simula un entorno industrial corrosivo. La muestra se sumerge en ácido sulfúrico, ácido clorhídrico o solución de hidróxido de sodio. La concentración y la temperatura se ajustan según las necesidades reales. El tiempo de inmersión varía de unas pocas horas a varias semanas. La muestra se extrae periódicamente para medir la pérdida de masa y la morfología superficial, así como para analizar la disolución de la fase de plata y la estabilidad de la fase de tungsteno. La solución debe reemplazarse periódicamente para mantener la actividad química. Las pruebas electroquímicas evalúan los mecanismos de corrosión según la norma ASTM G59. La muestra se coloca en una celda electrolítica como electrodo de trabajo, se aplican diferentes potenciales y se miden las curvas de polarización. La prueba registra el potencial de corrosión y la densidad de corriente de corrosión para analizar el comportamiento electroquímico de la interfaz plata-tungsteno. El entorno incluye electrolitos neutros o ácidos, y es necesario controlar el contenido de oxígeno.

El entorno de prueba debe simular condiciones reales de uso, como entornos húmedos, con contenido de azufre o de alta temperatura. El pretratamiento de la muestra incluye el pulido y la limpieza para eliminar las impurezas superficiales. Las observaciones muestran que las aleaciones con microestructuras optimizadas presentan una mayor resistencia a la corrosión en entornos ácidos y con niebla salina, siendo la baja porosidad la clave. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de sistemas dinámicos de pruebas de corrosión o la combinación de simulaciones multientorno para mejorar la precisión de la evaluación.

5.2.2 Métodos de prueba del rendimiento antioxidante

La prueba de resistencia a la oxidación evalúa la resistencia a la oxidación de la aleación de plata y tungsteno en entornos con alta temperatura o oxígeno, reflejando la estabilidad química de las fases de plata y tungsteno. El método de prueba debe simular las condiciones reales de uso, medir la formación de la capa de óxido y la variación de las propiedades del material, y proporcionar una base cuantitativa para la resistencia a la oxidación.

La prueba de oxidación a alta temperatura es un método común. La muestra se coloca en un horno de mufla, se calienta a una temperatura específica y se expone al aire durante varias horas o días. La temperatura se ajusta según los requisitos de la aplicación, generalmente por encima del punto de fusión de la plata, pero por debajo del punto de fusión del tungsteno. La prueba registra la ganancia de masa y observa el espesor y el cambio de color de la capa de óxido superficial, como el óxido de plata para plata o el óxido de tungsteno. Múltiples ciclos simulan la oxidación a largo plazo y evalúan la degradación del rendimiento.

El análisis termogravimétrico (TGA) proporciona una detección dinámica. La muestra se calienta en una termobalanza desde temperatura ambiente hasta alta temperatura, y se registra la curva de variación de masa a lo largo del tiempo. Se utiliza oxígeno o aire como gas portador para medir la velocidad de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reacción de oxidación y la temperatura estable. Los resultados del análisis revelan el punto de inicio de la oxidación de la fase de plata y la capacidad antioxidante de la fase de tungsteno. El instrumento debe calibrarse para evitar la deriva térmica. La calorimetría diferencial de barrido (DSC) se utiliza como método auxiliar para detectar el efecto térmico de las reacciones de oxidación. Las muestras se analizan en atmósfera inerte y en atmósfera oxidante, y se comparan los picos endotérmicos o exotérmicos para determinar la temperatura crítica de la reacción de oxidación. Este método es adecuado para el análisis de trazas de oxidación y debe verificarse en combinación con datos de TGA.

5.3 Tecnología de caracterización de la microestructura de aleaciones de plata y tungsteno

La tecnología de caracterización de la microestructura de aleaciones de plata-tungsteno revela la morfología del grano, la distribución de fases y las características de los defectos mediante diversos métodos analíticos, lo que proporciona una base microscópica para la optimización del rendimiento. La tecnología de caracterización debe combinarse con la preparación de la muestra y las condiciones del instrumento para garantizar la precisión y repetibilidad de los resultados.

5.3.1 Método de observación con microscopio metalográfico

El método de observación con microscopio metalográfico es un método básico para caracterizar la microestructura de las aleaciones de plata y tungsteno. El tamaño del grano, la distribución de fases y las características de los poros se revelan mediante la preparación de la muestra y el análisis microscópico. El método es adecuado para la evaluación estructural preliminar y se combina con técnicas de corrosión e iluminación para mejorar el contraste. La preparación de la muestra es un paso clave. Se toma una muestra representativa, se corta al tamaño adecuado, se pule la superficie hasta obtener una superficie plana y se refina gradualmente hasta obtener una malla alta con papel de lija. El pulido utiliza una suspensión de diamante u óxido de aluminio para obtener un efecto espejo. El tratamiento contra la corrosión utiliza reactivos químicos, como una solución de alcohol de ácido nítrico, para revelar el límite entre la fase de plata y la fase de tungsteno. El tiempo de corrosión se controla para evitar el sobregabado y afectar la claridad de la microestructura.

La observación se realizó con un microscopio óptico con aumentos de 50x a 1000x, según las características estructurales. La iluminación de campo claro mostró la morfología del grano, mientras que la luz de campo oscuro o polarizada mejoró el contraste de los límites de fase. Las partículas de tungsteno se observaron oscuras, las fases de plata, brillantes, y los poros, como cavidades negras. Se registraron imágenes multirregionales para analizar el tamaño del grano y la uniformidad de su distribución.

Los puntos clave de la prueba incluyen la limpieza de la muestra para evitar que la contaminación afecte la lente del microscopio. Es necesario ajustar la intensidad y el enfoque de la iluminación para optimizar la calidad de la imagen. La observación muestra que la aleación sinterizada optimizada presenta límites de grano nítidos, baja porosidad y una microestructura uniforme. El método es adecuado para una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

evaluación rápida y debe combinarse con el microscopio electrónico de barrido (MEB) para verificar los detalles.

5.3.2 Aplicación del análisis mediante microscopio electrónico de barrido

El análisis por microscopio electrónico de barrido (MEB) es un método eficiente para caracterizar la microestructura de las aleaciones de plata y tungsteno. Genera imágenes mediante la interacción entre el haz de electrones y la muestra, revelando la morfología del grano, la distribución de fases y los detalles de los defectos. El MEB es adecuado para la observación de alta resolución y, en combinación con la espectroscopia de energía dispersiva (EDS), proporciona información sobre la distribución de elementos.

La preparación de la muestra incluye corte, esmerilado y pulido para obtener una superficie plana. El recubrimiento de oro o carbono mejora la conductividad y previene los efectos de carga del haz de electrones. La muestra se coloca en la cámara de muestra del microscopio electrónico de barrido (MEB), y el entorno de vacío mantiene la estabilidad del haz de electrones. El voltaje de aceleración suele estar entre 5 y 20 kV, y la distancia de trabajo se ajusta según el aumento.

Observe el tamaño y la morfología del grano enfocado. Las partículas de tungsteno son poligonales o esféricas, y la distribución de la fase de plata es en malla o en agregados. La ampliación varía de cientos a decenas de miles de veces, mostrando poros microscópicos y microfisuras. El análisis EDS determina la proporción de plata y tungsteno e identifica impurezas u óxidos en la interfaz. Las imágenes de electrones secundarios resaltan la morfología de la superficie, y las imágenes de electrones reflejados mejoran el contraste del límite de fase.

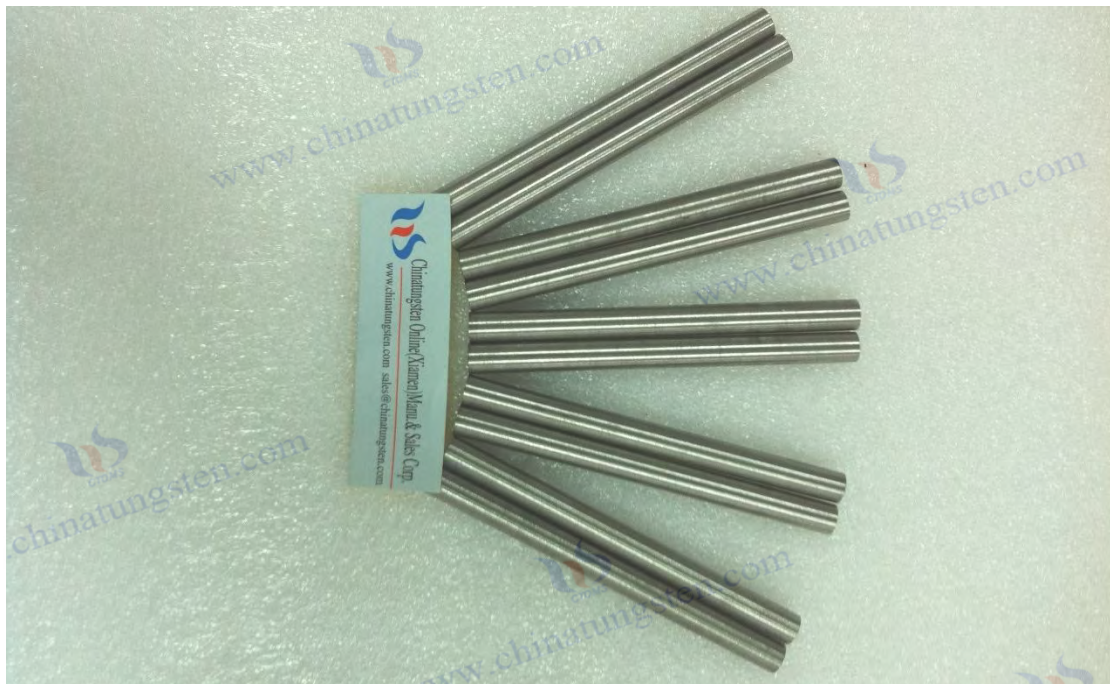
Los puntos clave de la prueba incluyen la correspondencia entre voltaje y corriente. Un voltaje demasiado alto puede dañar la muestra. La muestra debe estar limpia para evitar la contaminación. La recopilación de datos requiere mediciones multipunto para garantizar la representatividad. Las observaciones muestran que la aleación sinterizada optimizada presenta baja porosidad, buena unión en la interfaz y la EDS verifica una distribución de fase uniforme. Las áreas de aplicación incluyen el análisis de defectos y la investigación del estado de fase, y las líneas de optimización incluyen el desarrollo de SEM ambiental para mejorar las capacidades de observación dinámica.

5.3.3 Análisis estructural por difracción de rayos X

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica importante para analizar la estructura cristalina y la composición de fases de la aleación de plata y tungsteno. Genera patrones de difracción a través de la interacción de los rayos X con la red de la muestra, revelando la fase cristalina, la orientación del grano y el estado de tensión. La DRX es adecuada para el análisis cuantitativo de las propiedades microestructurales. La preparación de la muestra debe molerse en polvo o bloques planos con superficie lisa para evitar la interferencia de dispersión. La muestra se coloca en el equipo de DRX, y el vacío o la atmósfera inerte son opcionales para evitar que la oxidación afecte los resultados. La fuente de rayos X es radiación Cu K α , el ángulo de escaneo es de 10° a 90° y el tamaño del paso se ajusta según la resolución.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La identificación de la fase cristalina del enfoque analítico, los picos de difracción de plata y tungsteno corresponden a estructuras cúbicas centradas en la cara y cúbicas centradas en el cuerpo, respectivamente. La intensidad y el ancho del pico reflejan el tamaño del grano y la microdeformación. La fórmula de Scherle calcula el tamaño de grano: $D = K\lambda / (\beta \cos\theta)$, donde D es el tamaño de grano, β es el ancho del pico y θ es el ángulo de difracción. El desplazamiento de la posición de pico analiza la tensión residual, y la división de picos indica la coexistencia de múltiples fases. Los puntos clave de la prueba incluyen la calibración del instrumento y la eliminación de errores del mismo. La uniformidad de la muestra afecta los resultados, y se requieren múltiples pruebas para obtener el valor promedio. Las observaciones muestran que las aleaciones con procesos optimizados presentan picos de difracción estrechos, granos finos y baja tensión residual. Las áreas de aplicación incluyen la cuantificación de fases y la investigación de defectos de red, y las direcciones de optimización incluyen la difracción de rayos X (DRX) con radiación de sincrotrón para mejorar la resolución.



CTIA GROUP LTD Aleación de tungsteno y plata

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Capítulo 6: Campos de aplicación de la aleación de plata y tungsteno

La aleación de plata y tungsteno ha demostrado un amplio potencial de aplicación en diversos campos de alta demanda gracias a su excelente conductividad eléctrica y térmica, dureza y resistencia a la corrosión. Su microestructura única y sus propiedades físicas y químicas la convierten en un material ideal para industrias como la eléctrica, la de soldadura y la aeroespacial.

6.1 Aplicación de la aleación de plata y tungsteno en el campo eléctrico

La aleación de plata y tungsteno se utiliza ampliamente en componentes clave como interruptores automáticos de alta tensión, relés e interruptores de potencia de baja tensión en el sector eléctrico. Su alta conductividad y resistencia a la erosión por arco eléctrico satisfacen las necesidades de alta corriente y conmutación frecuente. Las propiedades no magnéticas de la aleación evitan las interferencias electromagnéticas, y su dureza y resistencia al desgaste prolongan la vida útil de los contactos, lo que la convierte en un material indispensable en equipos eléctricos. Sus aplicaciones abarcan el control industrial, la transmisión de energía y los electrodomésticos, y su optimización del rendimiento garantiza su fiabilidad en diferentes entornos.

6.1.1 Ventajas de aplicación en interruptores de potencia de baja tensión

Las ventajas de la aleación de plata-tungsteno en interruptores de potencia de baja tensión residen en su excelente rendimiento integral, especialmente en condiciones de conmutación de alta corriente y resistencia al arco eléctrico. Los interruptores de potencia de baja tensión se utilizan para controlar el encendido y apagado de circuitos y deben soportar operaciones frecuentes y descargas de arco eléctrico. Su alta dureza, antiadherencia y conductividad la convierten en la opción ideal. Su uso en los contactos de los interruptores mejora significativamente la seguridad y la vida útil del equipo.

La alta conductividad de la plata garantiza una ruta de baja resistencia, reduce la pérdida de energía durante la conmutación y mejora la eficiencia operativa. El alto punto de fusión y la dureza del tungsteno resisten la erosión por arco eléctrico y prolongan la vida útil de los contactos, especialmente en situaciones de conmutación de alta frecuencia. Sus propiedades antiadherentes evitan que los contactos se adhieran al material de acoplamiento, lo que garantiza una conmutación fiable. La aleación, con su microestructura optimizada, se mantiene estable en entornos húmedos o con contenido de azufre, lo que mejora su adaptabilidad ambiental.

En aplicaciones prácticas, los contactos de aleación de plata-tungsteno ofrecen un buen rendimiento en interruptores de potencia de baja tensión, especialmente en el control de motores industriales y la protección de electrodomésticos. En comparación con materiales tradicionales como la plata pura o las aleaciones a base de cobre, la aleación de plata-tungsteno ofrece una resistencia al desgaste y a los arcos eléctricos significativamente superior, lo que reduce la frecuencia de mantenimiento. Las opciones de optimización incluyen ajustar la relación plata-tungsteno para equilibrar la conductividad y la durabilidad, o mejorar aún más la resistencia a la corrosión mediante un recubrimiento superficial.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1.1.1 Requisitos de rendimiento para los materiales de los interruptores de potencia de baja tensión

Los requisitos de rendimiento de los interruptores de potencia de baja tensión para los materiales determinan directamente la viabilidad de la aplicación de aleaciones de plata-tungsteno, que deben cumplir con los requisitos de fiabilidad en entornos de alta corriente, conmutación frecuente y arcos eléctricos. Los requisitos de rendimiento abarcan la conductividad, la dureza, la resistencia a la erosión por arco, la antiadherencia y la resistencia a la corrosión para garantizar la seguridad y una larga vida útil del interruptor.

La conductividad es el requisito principal, y el material debe proporcionar una ruta de baja resistencia para una transmisión de corriente eficiente. Los interruptores de potencia de bajo voltaje deben transportar de cientos a miles de amperios de corriente al estar encendidos. Una conductividad insuficiente puede causar sobrecalentamiento o pérdida de energía, lo que afecta la eficiencia del equipo. La red de fase de plata de la aleación de plata y tungsteno cumple este requisito y garantiza un flujo de corriente uniforme.

La dureza es un atributo clave, y los contactos deben resistir el desgaste mecánico y el choque de arco. Las operaciones de conmutación frecuentes pueden causar deformación superficial o desprendimiento del material, y los materiales con dureza insuficiente son propensos a fallar. La alta dureza del tungsteno proporciona un soporte sólido para la aleación de plata-tungsteno, adaptándose a escenarios de contacto de alta frecuencia y prolongando su vida útil. La capacidad de resistir la erosión por arco es un requisito fundamental. El arco generado al desconectar el interruptor puede fundir o evaporar el material y erosionar la superficie de contacto. El material debe permanecer estable a altas temperaturas para reducir las pérdidas. El alto punto de fusión de la fase de tungsteno y la conductividad térmica de la fase de plata de la aleación de plata-tungsteno se combinan para resistir eficazmente la erosión por arco y son adecuados para aplicaciones de desconexión de alta corriente.

El rendimiento antiadherente garantiza una desconexión fiable. El contacto puede adherirse al material de acoplamiento por contacto mecánico o arco eléctrico, lo que puede provocar un fallo del interruptor. El material presenta baja adherencia. El esqueleto de tungsteno y la optimización de la humectación de plata de la aleación de plata y tungsteno reducen el riesgo de adherencia y garantizan la estabilidad operativa.

La resistencia a la corrosión garantiza la adaptabilidad ambiental. Los interruptores pueden estar expuestos a atmósferas húmedas, sulfurosas o industriales, y la corrosión puede reducir la conductividad y las propiedades mecánicas. La resistencia a la oxidación de la fase de tungsteno y la estabilidad de la fase de plata de la aleación de plata y tungsteno cumplen con este requisito, y la microestructura optimizada aumenta aún más la durabilidad.

Estos requisitos de rendimiento, en conjunto, constituyen las estrictas normas para los materiales de los interruptores de potencia de baja tensión. La aleación de plata-tungsteno cumple eficazmente con estos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

requisitos gracias a su diseño de microestructura y composición, proporcionando un soporte fiable para el campo eléctrico.

6.1.1.2 Aplicaciones de la aleación de plata y tungsteno en interruptores de potencia de bajo voltaje

La aleación de plata y tungsteno se utiliza principalmente en contactos clave de interruptores de potencia de baja tensión, lo que afecta directamente su rendimiento de encendido y apagado y su vida útil. Las piezas de aplicación específicas incluyen contactos móviles, estáticos y de aislamiento de arco, con diferentes requisitos funcionales.

El contacto móvil es la pieza de contacto móvil en el interruptor de potencia de bajo voltaje. La aleación de plata-tungsteno se usa ampliamente en este tipo de interruptores debido a su alta conductividad y resistencia a la erosión por arco. El contacto móvil está sujeto a impactos mecánicos y a la acción del arco al cerrar y abrir el interruptor. La dureza de la aleación previene el desgaste, y la fase de plata asegura una transmisión de corriente de baja resistencia. El contacto estático es una pieza de contacto fija que trabaja en conjunto con el contacto móvil. La alta resistencia al desgaste y las propiedades antiadherentes de la aleación de plata-tungsteno garantizan una fiabilidad de contacto estable a largo plazo. Los contactos de aislamiento de arco se utilizan para aislar arcos eléctricos al interrumpir corrientes elevadas. El alto punto de fusión y la resistencia a la oxidación de la aleación reducen eficazmente la ablación del arco y prolongan la vida útil de los componentes.

La selección de estas piezas se basa en las propiedades microestructurales de la aleación de plata-tungsteno, donde el esqueleto de tungsteno proporciona soporte mecánico y la red de plata optimiza la conductividad. En el diseño optimizado, la superficie de contacto puede mejorarse aún más mediante pulido o recubrimiento electroquímico para adaptarse a operaciones de alta frecuencia o entornos húmedos. En aplicaciones prácticas, la combinación de contactos móviles y estáticos ofrece un buen rendimiento en el control de motores industriales y en interruptores automáticos domésticos, y los contactos de aislamiento de arco son especialmente críticos en entornos de alta corriente.

6.1.1.3 Ventajas del uso de materiales PCB en interruptores de potencia de bajo voltaje en comparación con otros materiales

En comparación con otros materiales de uso común, como la plata pura, las aleaciones a base de cobre y el óxido de plata-cadmio, la aleación de plata-tungsteno presenta importantes ventajas de aplicación en interruptores de potencia de baja tensión. Estas ventajas se deben a su combinación única de propiedades y son especialmente adecuadas para entornos de alta demanda.

En comparación con la plata pura, la aleación de plata-tungsteno presenta mayor dureza y resistencia a la erosión por arco eléctrico. Si bien la plata pura posee una excelente conductividad, es blanda y fácil de desgastar. Se funde rápidamente bajo la acción del arco eléctrico y su vida útil es corta. Tras la adición de tungsteno, la aleación de plata-tungsteno mejora su dureza y su excelente resistencia a la ablación, lo que prolonga la vida útil del contacto, especialmente en situaciones de conmutación frecuente. La plata

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pura se oxida fácilmente en ambientes húmedos. La fase de tungsteno de la aleación de plata-tungsteno proporciona protección antioxidante y mejora su adaptabilidad ambiental.

En comparación con las aleaciones de cobre, las aleaciones de plata-tungsteno presentan mejor conductividad y propiedades antiadherentes. Las aleaciones de cobre tienen mayor dureza, pero menor conductividad que la plata, mayor resistencia y son propensas a la generación de calor. La red de fase de plata de las aleaciones de plata-tungsteno reduce la resistencia y la pérdida de energía, y su propiedad antiadherente previene la adhesión por contacto y garantiza una desconexión fiable. Las aleaciones de cobre son propensas a fundirse y deformarse bajo arcos eléctricos, mientras que la fase de tungsteno de alto punto de fusión de las aleaciones de plata-tungsteno ofrece una resistencia eficaz y es adecuada para aplicaciones de alta corriente.

En comparación con el óxido de plata-cadmio, la aleación de plata-tungsteno no es tóxica y ofrece una mejor resistencia a la corrosión. El óxido de plata-cadmio ofrece buena resistencia al arco eléctrico y a la soldadura, pero el vapor de cadmio es tóxico y las normativas ambientales restringen su uso. La aleación de plata-tungsteno no contiene elementos nocivos y cumple con los requisitos ambientales. Su fase de tungsteno ofrece una mejor resistencia a la corrosión que el óxido de cadmio, especialmente en entornos ácidos o con azufre. Si bien el óxido de plata-cadmio presenta una alta conductividad, es propenso al envejecimiento tras un uso prolongado. La optimización de la microestructura de la aleación de plata-tungsteno garantiza su fiabilidad a largo plazo.

Estas ventajas permiten que la aleación de plata y tungsteno sustituya a los materiales tradicionales en interruptores de potencia de baja tensión. Las líneas de optimización incluyen la mejora del rendimiento mediante polvos a escala nanométrica o el desarrollo de recubrimientos compuestos para mejorar la resistencia al arco eléctrico.

6.1.2 Demanda de aleaciones eléctricas para interruptores de alta tensión

Las aleaciones eléctricas para interruptores de alta tensión deben cumplir requisitos de rendimiento extremadamente altos para soportar altas corrientes, arcos eléctricos fuertes y entornos extremos, garantizando así el funcionamiento seguro de los sistemas eléctricos. Como material candidato, la aleación de plata-tungsteno debe cumplir con los requisitos específicos de los interruptores de alta tensión para ofrecer soporte técnico a las aplicaciones.

La conductividad eléctrica es un requisito fundamental. Los interruptores de alta tensión requieren una ruta de baja resistencia para reducir los efectos térmicos al desconectar miles de amperios de corriente. La red de fase de plata de la aleación de plata-tungsteno cumple este requisito y garantiza una transmisión eficiente de la corriente. La capacidad de resistir la erosión por arco eléctrico es crucial. Los arcos eléctricos fuertes pueden fundir materiales tradicionales. La fase de tungsteno, con su alto punto de fusión, y la fase de plata, conductora térmicamente, de la aleación se combinan para resistir la ablación y prolongar la vida útil. La dureza y la resistencia al desgaste favorecen la estabilidad mecánica. Los contactos móviles y estáticos de los interruptores de alta tensión suelen estar en contacto bajo alta presión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y deben resistir el desgaste y la deformación. La alta dureza del tungsteno proporciona un soporte sólido, y la ductilidad de la plata amortigua la tensión, lo que resulta ideal para un funcionamiento dinámico. Su rendimiento antiadherente garantiza una desconexión fiable. Los contactos pueden adherirse a altas temperaturas del arco, y la baja adherencia de la aleación de plata-tungsteno previene fallos.

La resistencia a altas temperaturas y a la corrosión se adapta a entornos extremos. Los interruptores de alta tensión pueden estar expuestos a altas temperaturas, humedad o atmósferas industriales, y las aleaciones deben resistir la oxidación y la corrosión química. La resistencia a la oxidación del tungsteno y la estabilidad de la plata cumplen este requisito, y sus microestructuras optimizadas aumentan aún más su durabilidad. Sus propiedades no magnéticas evitan las interferencias electromagnéticas y garantizan un control preciso de los sistemas de alta tensión.

Estas demandas impulsan el desarrollo de aleaciones de plata y tungsteno en interruptores de alta tensión. Las líneas de optimización incluyen el ajuste de la proporción de la composición o la adopción de un diseño de gradiente funcional para afrontar las mayores corrientes y los retos ambientales.

6.1.2.1 Entorno de trabajo del interruptor de alta tensión y requisitos especiales para aleaciones eléctricas

El entorno de trabajo de los interruptores de alta tensión es complejo y riguroso, con altas temperaturas, alta presión, arcos eléctricos fuertes y diversos medios corrosivos. Esto exige requisitos de rendimiento especiales para las aleaciones eléctricas a fin de garantizar un funcionamiento estable a largo plazo. El entorno de trabajo y los requisitos influyen directamente en la selección y optimización de materiales.

El entorno de trabajo incluye campos eléctricos de alto voltaje y fuertes corrientes. El interruptor debe desconectar de miles a decenas de miles de amperios de corriente, lo que genera arcos eléctricos de alta temperatura, cuya temperatura puede alcanzar miles de grados. Las condiciones ambientales incluyen atmósferas industriales, áreas húmedas o con contenido de azufre, y gases corrosivos como el dióxido de azufre pueden acelerar la degradación del material. Las vibraciones mecánicas y los impactos son comunes en el funcionamiento de los interruptores, y los cambios extremos de temperatura aumentan la tensión del material. Las aplicaciones en exteriores también están sujetas a la radiación ultravioleta y a la intemperie, mientras que las aplicaciones en interiores pueden requerir condiciones selladas pero con alta humedad. Los requisitos especiales incluyen una conductividad ultraalta para soportar la transmisión de alta corriente, reducir el calentamiento resistivo y garantizar la eficiencia. La resistencia a la erosión por arco es fundamental. La ablación por arco puede causar fallos en los contactos, y el material debe permanecer estable a altas temperaturas. La dureza y la resistencia al desgaste resisten el desgaste mecánico y el impacto del arco, prolongando así la vida útil de los contactos. El rendimiento antiadherente garantiza una desconexión fiable y evita que la adhesión de los contactos provoque fallos. La resistencia a altas temperaturas y a la corrosión soporta entornos extremos, y la aleación debe resistir la oxidación y los ataques químicos. Las propiedades no magnéticas evitan las interferencias electromagnéticas y garantizan la precisión de los sistemas de alta tensión. La consistencia microestructural reduce el riesgo de fallos locales, y la optimización del proceso es clave.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Estos requisitos han promovido el desarrollo de aleaciones eléctricas de alto rendimiento, y las aleaciones de plata y tungsteno deben cumplir estos requisitos mediante ajustes de composición y proceso.

6.1.2.2 Rendimiento de la aleación de plata y tungsteno para cumplir con los requisitos de los interruptores de alto voltaje

La aleación de plata-tungsteno cumple eficazmente con los exigentes requisitos de los interruptores de alta tensión gracias a su combinación única de propiedades. El efecto sinérgico de la fase de plata y la fase de tungsteno destaca por su conductividad, resistencia a la erosión por arco eléctrico y durabilidad, lo que proporciona un soporte fiable para aplicaciones de alta tensión.

La red de fase de plata proporciona una conductividad ultraalta. La alta densidad electrónica de la plata garantiza una trayectoria de baja resistencia, favorece la transmisión de corrientes elevadas y reduce los efectos térmicos. El alto punto de fusión del tungsteno mejora la resistencia a la erosión por arco. El esqueleto de tungsteno se mantiene estable a altas temperaturas de arco. La conductividad térmica de la fase de plata dispersa rápidamente el calor y reduce las pérdidas por ablación. Las pruebas demuestran que el daño superficial de los contactos de aleación de plata-tungsteno al desconectar corrientes elevadas es significativamente menor que el de las aleaciones de cobre.

La dureza y la resistencia al desgaste se sustentan en partículas de tungsteno, y la aleación resiste impactos mecánicos y desgaste frecuente por contacto, prolongando así su vida útil. La ductilidad de la plata amortigua la tensión, y la dureza es uniforme tras optimizar la microestructura, lo que la hace ideal para un funcionamiento dinámico. El rendimiento antiadherente se logra gracias a la baja adhesión del tungsteno y a la optimización de la humectación de la plata. El contacto no se adhiere fácilmente al material dual bajo la acción del arco, lo que garantiza una desconexión fiable.

La resistencia a altas temperaturas se debe al alto punto de fusión del tungsteno y a la estabilidad de la plata. La aleación mantiene su integridad estructural a temperaturas extremas. La resistencia a la corrosión está garantizada por la resistencia a la oxidación del tungsteno y la estabilidad química de la plata. La sinterización optimizada reduce la porosidad y mejora el rendimiento en entornos húmedos o con contenido de azufre. Sus propiedades no magnéticas evitan las interferencias electromagnéticas y son idóneas para el control preciso de sistemas de alta tensión.

La optimización de la microestructura mejora aún más el rendimiento, la estructura densa reduce los defectos y el polvo a escala nanométrica refina los granos y mejora la consistencia. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de diseños de gradientes funcionales o recubrimientos anticorrosivos para afrontar los mayores retos ambientales y de corriente.

6.1.3 Aplicación de relés e interruptores automáticos de aire

La aplicación de la aleación de plata y tungsteno en relés e interruptores automáticos de aire refleja su versatilidad en el campo eléctrico. Su alta conductividad y resistencia al arco eléctrico satisfacen los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

requisitos de fiabilidad y larga vida útil de estos dispositivos, y se utilizan ampliamente en control industrial y protección eléctrica.

En los relés, se utiliza una aleación de plata-tungsteno para los contactos móviles y estáticos, responsables de una respuesta rápida a las variaciones de corriente. La conmutación frecuente de los relés genera pequeños arcos eléctricos. La alta dureza y la resistencia a la erosión por arco de la aleación prolongan la vida útil de los contactos, y la fase de plata garantiza una transmisión de señal de baja resistencia. Sus propiedades no magnéticas evitan las interferencias electromagnéticas y son adecuadas para entornos sensibles a las interferencias electromagnéticas, como los sistemas de control automatizados. Tras optimizar la microestructura, los contactos mantienen la estabilidad en operaciones de alta frecuencia.

En los interruptores automáticos de aire, se utiliza una aleación de plata-tungsteno en los contactos principales y los contactos de aislamiento de arco para desconectar corrientes de cientos a miles de amperios. Los contactos principales se basan en la conductividad y la resistencia al desgaste de la aleación para garantizar una conmutación eficiente, mientras que los contactos de aislamiento de arco utilizan la fase de tungsteno de alto punto de fusión para resistir la erosión por arco intenso. La aleación presenta una excelente resistencia a la oxidación en ambientes atmosféricos y es adecuada para aplicaciones exteriores e industriales. En la práctica, la vida útil de los contactos de los interruptores automáticos de aire se prolonga significativamente y la frecuencia de mantenimiento se reduce. Entre las ventajas de la aplicación se incluyen alta fiabilidad, larga vida útil y adaptabilidad ambiental. Las opciones de optimización incluyen el ajuste de la relación plata-tungsteno para equilibrar la conductividad y la durabilidad, o la mejora de la resistencia a la corrosión mediante un tratamiento superficial.

6.1.3.1 Principio de funcionamiento del relé y requisitos de los materiales de contacto

Los relés controlan el encendido y apagado de circuitos mediante principios electromagnéticos. Su principio de funcionamiento se basa en la energización de la bobina para generar un campo magnético, lo que impulsa el contacto móvil para que contacte o se separe del contacto estático y así lograr la conmutación de señal o corriente. Su rendimiento depende de la fiabilidad y durabilidad del material del contacto, lo que impone requisitos específicos.

El principio de funcionamiento es que, al energizar la bobina, el campo magnético atrae la armadura, el contacto móvil y el contacto estático se cierran y el circuito se conecta. Al desconectar la alimentación, el campo magnético desaparece, el contacto móvil se separa por el resorte y el circuito se desconecta. El funcionamiento frecuente genera pequeños arcos eléctricos, y los puntos de contacto deben resistir impactos mecánicos y efectos térmicos. Los relés se utilizan ampliamente en el control de automatización y electrodomésticos, y el entorno de trabajo puede presentar humedad o interferencias electromagnéticas.

Los requisitos de los materiales de contacto incluyen una alta conductividad para garantizar una trayectoria de baja resistencia y facilitar una transmisión eficiente de la señal. La resistencia a la erosión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

por arco eléctrico es fundamental, ya que pequeños arcos pueden quemar el material y deben permanecer estables a altas temperaturas. La dureza y la resistencia al desgaste resisten el desgaste mecánico del contacto y prolongan su vida útil. Las propiedades antiadherentes previenen la adhesión del contacto y garantizan una desconexión fiable. La resistencia a la corrosión se adapta a entornos húmedos o con azufre para evitar que la oxidación afecte la conductividad. Las propiedades no magnéticas evitan las interferencias electromagnéticas y garantizan un control preciso. La consistencia microestructural reduce los fallos locales, y la optimización del proceso es una condición necesaria. Estos requisitos garantizan conjuntamente la alta eficiencia y la larga vida útil del relé, y la aleación de tungsteno y plata debe satisfacer las necesidades a través de la coincidencia de rendimiento.

6.1.3.2 Efecto de la aplicación de la aleación de plata y tungsteno en relés

El efecto de aplicación de la aleación de plata y tungsteno en relés es notable y sus ventajas de rendimiento se reflejan plenamente en los contactos móviles y estáticos, satisfaciendo las necesidades de operación de alta frecuencia y entornos sensibles electromagnéticos y mejorando la confiabilidad del equipo.

La alta conductividad de la fase de plata proporciona una ruta de baja resistencia, lo que garantiza la eficiencia de la transmisión de la señal y cumple con los requisitos de respuesta rápida de los relés. El alto punto de fusión y la dureza del tungsteno resisten la erosión por microarco y prolongan la vida útil de los contactos, especialmente en entornos de conmutación de alta frecuencia. La resistencia a la adherencia se logra mediante la optimización del esqueleto de tungsteno y la humectación de plata. Los contactos no se adhieren fácilmente bajo contacto mecánico o acción de arco, lo que garantiza una desconexión fiable. Sus propiedades no magnéticas evitan las interferencias electromagnéticas y son adecuados para equipos de control y comunicación de automatización.

La aleación con microestructura optimizada mantiene la estabilidad en ambientes húmedos, y su estructura densa reduce la penetración de medios corrosivos, además de ofrecer una resistencia a la corrosión superior a la de los contactos de plata pura. En la práctica, los contactos de aleación de plata-tungsteno ofrecen un excelente rendimiento en relés industriales y dispositivos de protección de electrodomésticos, y su vida útil es varias veces mayor que la de los materiales tradicionales. Las pruebas demuestran que el daño superficial se reduce significativamente tras el funcionamiento a alta frecuencia, y la conductividad se mantiene constante. Las líneas de optimización incluyen el ajuste de la relación plata-tungsteno para mejorar la conductividad o el refinamiento de los granos mediante polvo nanométrico para mejorar la resistencia al arco. El efecto de la aleación de plata-tungsteno en relés proporciona un respaldo fiable para su aplicación en el campo del control eléctrico.

6.1.3.3 Requisitos de rendimiento de los interruptores automáticos de aire y compatibilidad de la aleación de plata y tungsteno

Los interruptores automáticos de aire utilizan aire como medio de extinción de arco para desconectar el circuito. Los requisitos de rendimiento se centran en la conducción de corrientes elevadas, la resistencia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a la erosión del arco y la estabilidad a largo plazo. Las características de la aleación de plata-tungsteno cumplen plenamente estos requisitos, mostrando un excelente potencial de aplicación. Los requisitos de rendimiento incluyen alta conductividad, que soporta la transmisión de corriente de cientos a miles de amperios y reduce el calor por resistencia. La resistencia a la erosión por arco eléctrico es fundamental. La desconexión de grandes corrientes genera arcos eléctricos potentes, que deben resistir la ablación a alta temperatura. La dureza y la resistencia al desgaste garantizan que los contactos resistan impactos mecánicos y un uso frecuente. Las propiedades antiadherentes previenen la adhesión de los contactos y garantizan una desconexión fiable. La resistencia a altas temperaturas y a la corrosión se adapta a entornos industriales o exteriores y prolonga la vida útil. La consistencia de la microestructura reduce los fallos locales, y la optimización del proceso es clave. La adaptabilidad de la aleación de plata-tungsteno se refleja en la alta conductividad de la fase de plata, que cumple con los requisitos de transmisión de corriente, el alto punto de fusión y la dureza del tungsteno, que resisten la erosión por arco eléctrico intenso, y la significativa prolongación de la vida útil de los contactos. La conductividad térmica de la plata dispersa el calor y la capacidad antiadherente se logran mediante la optimización del esqueleto de tungsteno, ideal para la desconexión de alta corriente. La resistencia a la oxidación del tungsteno y la estabilidad de la plata mejoran la resistencia a la corrosión, y la microestructura densa reduce los defectos, lo que resulta adecuado para entornos húmedos o con contenido de azufre. En aplicaciones prácticas, los contactos de aleación de plata-tungsteno ofrecen un excelente rendimiento en interruptores automáticos de aire, especialmente en la distribución eléctrica industrial y la protección de edificios, con intervalos de mantenimiento prolongados. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de un diseño de gradiente funcional para mejorar el rendimiento local o la mejora de la resistencia a la corrosión mediante un recubrimiento superficial. La adaptabilidad de la aleación de plata y tungsteno proporciona una base sólida para su amplia aplicación en interruptores automáticos de aire.

6.1.4 Aplicación en seccionadores y seccionadores de puesta a tierra

La aplicación de la aleación de plata-tungsteno en seccionadores e interruptores de puesta a tierra refleja su importante función en equipos eléctricos de alta tensión. Estos interruptores se utilizan para garantizar un aislamiento seguro y la protección de la puesta a tierra de los circuitos. Su alta conductividad, resistencia al arco eléctrico y durabilidad la convierten en un material ideal. El uso de la aleación en estos componentes mejora la seguridad y la estabilidad operativa de los equipos, especialmente en entornos exteriores o industriales.

6.1.4.1 Requisitos de función y materiales para seccionadores y seccionadores de puesta a tierra

Los seccionadores y seccionadores de puesta a tierra desempeñan funciones críticas en los sistemas eléctricos, lo que exige un rendimiento específico de los materiales para garantizar un funcionamiento seguro y una fiabilidad a largo plazo. Las funciones y los requisitos guían directamente la selección y optimización de los materiales.

La función del interruptor de aislamiento es desconectar el circuito sin corriente de carga, proporcionar un punto de aislamiento visible y prevenir el riesgo de descarga eléctrica durante operaciones incorrectas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

o mantenimiento. El interruptor de puesta a tierra se utiliza para conectar a tierra el equipo o la línea, liberar la carga residual y proteger la seguridad del personal y el equipo. Ambos operan en entornos de alta tensión y pueden estar expuestos a arcos eléctricos, descargas mecánicas y condiciones climáticas extremas.

Los requisitos del material incluyen una alta conductividad para garantizar una trayectoria de baja resistencia, soportar la transmisión de corriente y reducir los efectos térmicos. La resistencia a la erosión por arco eléctrico es fundamental. La desconexión o conexión puede generar arcos eléctricos, y se debe resistir la ablación por altas temperaturas. La dureza y la resistencia al desgaste resisten el desgaste mecánico y el uso frecuente, prolongando así su vida útil. Las propiedades antiadherentes previenen la adhesión por contacto y garantizan un funcionamiento fiable. La resistencia a la corrosión y a la intemperie se adapta a entornos exteriores como la lluvia, los rayos ultravioleta o las atmósferas industriales. Las propiedades no magnéticas evitan las interferencias electromagnéticas, la consistencia microestructural reduce los fallos locales y la optimización del proceso es una condición necesaria.

Estos requisitos garantizan la seguridad y durabilidad de los seccionadores y seccionadores de puesta a tierra, y la aleación de plata y tungsteno debe cumplir estos requisitos mediante la adaptación del rendimiento.

6.1.4.2 Ventajas de la aleación de plata-tungsteno en seccionadores y seccionadores de puesta a tierra

Las ventajas de la aleación de plata-tungsteno en seccionadores y seccionadores de puesta a tierra se deben a su excelente rendimiento, especialmente en entornos de alta tensión y exteriores, lo que mejora significativamente la fiabilidad del equipo. La red de fase de plata proporciona una alta conductividad. La alta densidad electrónica de la plata garantiza una ruta de baja resistencia, favorece una transmisión de corriente eficiente y reduce la pérdida de energía en seccionadores y seccionadores de puesta a tierra. El alto punto de fusión y la dureza del tungsteno confieren a la aleación una excelente resistencia a la erosión por arco. El arco generado al desconectar o conectar dificulta la fusión de los contactos, lo que prolonga su vida útil. Pruebas reales demuestran que el daño superficial de los contactos de aleación de plata-tungsteno bajo la acción del arco es significativamente menor que el de los materiales a base de cobre.

La dureza y la resistencia al desgaste se sustentan en partículas de tungsteno. La aleación resiste los impactos mecánicos y el desgaste por uso frecuente, y es apta para vibraciones y la intemperie en exteriores. La ductilidad de la plata amortigua la tensión, y la durabilidad del contacto se mejora gracias a la optimización de la microestructura. El rendimiento antiadherente se logra mediante la optimización del esqueleto de tungsteno y la humectación de plata. El contacto no se adhiere fácilmente al material dual durante el uso, lo que garantiza una desconexión fiable.

La resistencia a la corrosión y a la intemperie son ventajas para aplicaciones en exteriores, donde la resistencia a la oxidación del tungsteno y la estabilidad de la plata resisten la corrosión bajo la lluvia, los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rayos UV o en entornos industriales. Su microestructura densa reduce la porosidad y la penetración de medios corrosivos, y la aleación sinterizada optimizada ofrece un buen rendimiento en zonas costeras o industriales. Sus propiedades no magnéticas evitan las interferencias electromagnéticas y garantizan un control preciso de equipos de alta tensión.

En aplicaciones prácticas, los contactos de aleación de plata-tungsteno ofrecen un buen rendimiento en seccionadores de alta tensión e interruptores de puesta a tierra, especialmente en líneas de transmisión y subestaciones, donde se amplían los intervalos de mantenimiento y se mejora la seguridad. Las opciones de optimización incluyen ajustar la relación plata-tungsteno para mejorar la resistencia a la intemperie o mejorar aún más el rendimiento mediante recubrimientos anticorrosivos. Las ventajas de la aleación de plata-tungsteno sientan las bases para su uso generalizado en seccionadores e interruptores de puesta a tierra.

6.2 Aplicación de la aleación de plata y tungsteno en la electrónica

La aleación de plata y tungsteno se utiliza ampliamente en el campo de la electrónica debido a su excelente conductividad eléctrica y térmica, así como a su resistencia al desgaste, especialmente en procesos eléctricos, componentes de disipación de calor y conectores. Su microestructura y propiedades físicas y químicas la hacen adaptable a las necesidades de entornos de alta precisión y alta temperatura, mejorando la fiabilidad y el rendimiento de los equipos electrónicos.

6.2.1 Requisitos de rendimiento y aplicaciones de los electrodos EDM

Como material de electrodo para electromecanizado, la aleación de plata-tungsteno ofrece un buen rendimiento en el mecanizado por electrochispa (EDM) y el mecanizado electroquímico (ECM), y su rendimiento afecta directamente la precisión, la eficiencia y la vida útil del electrodo. Los electrodos de electromecanizado se utilizan para eliminar materiales metálicos y lograr un conformado de alta precisión mediante arco eléctrico o reacción electroquímica. La conductividad y la resistencia al desgaste de la aleación son fundamentales.

6.2.1.1 Requisitos del índice de rendimiento de los materiales de electrodos para la tecnología de electromecanizado

El proceso de electromecanizado exige un alto índice de rendimiento de los materiales de los electrodos para garantizar la calidad del procesamiento y la durabilidad del equipo. Este índice afecta directamente la eficiencia del procesamiento, la calidad superficial y la pérdida de electrodos, y debe ajustarse a cada proceso específico.

Una alta conductividad es un requisito fundamental. El electrodo debe proporcionar una trayectoria de baja resistencia para una transmisión de corriente eficiente y reducir la pérdida de energía. En la electroerosión, la densidad de corriente es alta y una conductividad insuficiente puede causar inestabilidad del arco, lo que afecta la precisión del mecanizado. La capacidad de resistir la erosión del

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

arco es crucial. La alta temperatura del arco puede fundir o evaporar el material del electrodo, que debe permanecer estable a alta densidad de energía. La dureza y la resistencia al desgaste resisten el desgaste mecánico y el impacto del arco, prolongando la vida útil del electrodo, especialmente en procesos repetidos.

El rendimiento antiadherente evita que el electrodo se adhiera a la pieza y garantiza la continuidad del proceso de mecanizado. La resistencia a altas temperaturas se adapta a la alta temperatura local generada por el arco y previene la deformación o falla del material. La resistencia a la corrosión combate la erosión química en el electrolito o en el entorno de mecanizado y mantiene la integridad de la superficie del electrodo. La consistencia microestructural reduce las pérdidas locales y optimiza la preparación del material como condición necesaria. Estos indicadores contribuyen conjuntamente a la alta eficiencia y precisión del electromecanizado, y los materiales de los electrodos deben cumplir con los requisitos mediante la optimización del rendimiento.

6.2.1.2 Ventajas de rendimiento de la aleación de plata y tungsteno como electrodo de electromecanizado

La aleación de plata y tungsteno presenta importantes ventajas de rendimiento como electrodo de electromecanizado. El efecto sinérgico de las fases de plata y tungsteno satisface los requisitos de alta precisión y durabilidad, y mejora la eficiencia del procesamiento.

La red de fase de plata proporciona una alta conductividad. La alta densidad electrónica de la plata garantiza una trayectoria de baja resistencia, facilita la transmisión eficiente de la corriente y reduce la inestabilidad del arco. El alto punto de fusión y la dureza del tungsteno confieren a la aleación una excelente resistencia a la erosión por arco. El esqueleto de tungsteno se mantiene estable a altas temperaturas de arco, y la conductividad térmica de la fase de plata dispersa rápidamente el calor y reduce la pérdida de electrodos. Las pruebas demuestran que la tasa de pérdida de los electrodos de aleación de plata-tungsteno en la electroerosión es menor que la de los electrodos de cobre.

La dureza y la resistencia al desgaste se sustentan en partículas de tungsteno, y la aleación resiste el impacto del arco eléctrico y el desgaste mecánico, prolongando así la vida útil del electrodo. La ductilidad de la plata amortigua la tensión, y la durabilidad se mejora gracias a la optimización de la microestructura. El rendimiento antiadherente se logra gracias a la baja adhesión del tungsteno y a la humectación optimizada de la plata. El electrodo no se adhiere fácilmente a la pieza de trabajo, lo que garantiza la continuidad del procesamiento.

La resistencia a altas temperaturas se debe al alto punto de fusión del tungsteno, y la aleación mantiene su integridad estructural bajo la alta temperatura local del arco. La resistencia a la corrosión está garantizada por la resistencia a la oxidación del tungsteno y la estabilidad de la plata. La sinterización optimizada reduce la porosidad y se adapta al entorno electrolítico. La densidad de la microestructura reduce los defectos, y el polvo a escala nanométrica refina los granos y mejora la consistencia. En aplicaciones prácticas, los electrodos de aleación de plata-tungsteno ofrecen un buen rendimiento en el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

procesamiento de moldes de precisión y piezas complejas, con una precisión de procesamiento y una calidad superficial superiores a las de los materiales tradicionales. Las opciones de optimización incluyen ajustar la relación plata-tungsteno para mejorar la conductividad o reducir aún más las pérdidas mediante el recubrimiento de la superficie.

6.2.1.3 Selección de electrodos de aleación de plata-tungsteno en diferentes escenarios de EDM

La selección de electrodos de aleación de plata y tungsteno debe optimizarse de acuerdo con los requisitos del proceso y las características de la pieza de trabajo del escenario de mecanizado eléctrico, y la relación plata-tungsteno y la microestructura deben ajustarse para cumplir con los diferentes requisitos de aplicación. En el mecanizado por electrochispa (EDM), se seleccionan aleaciones de plata-tungsteno con alto contenido de tungsteno (como 70 % W - 30 % Ag). Presentan una alta resistencia a la erosión por arco y son aptas para procesar metales con alto punto de fusión, como aleaciones de titanio o acero. Ofrecen bajas pérdidas y una larga vida útil, ideales para procesar moldes de precisión y formas geométricas complejas. La optimización del proceso de sinterización refina los granos y mejora la durabilidad. En el mecanizado electrolítico (ECM), se seleccionan aleaciones de plata-tungsteno con alto contenido de plata (como 30 % W - 70 % Ag). Presentan una excelente conductividad y son aptas para el decapado electrolítico de grandes áreas. La red de fase de plata facilita una distribución eficiente de la corriente, y el esqueleto de tungsteno proporciona soporte mecánico y se adapta al procesamiento continuo. El pulido superficial reduce la corrosión y optimiza la microestructura para mejorar la estabilidad. En el mecanizado microelectromecánico, se seleccionan aleaciones de plata-tungsteno a escala nanométrica. Presentan granos finos y una alta consistencia microestructural, ideales para micropiezas y mecanizado de alta precisión. Destacan por su baja pérdida y su antiadherencia, y su optimización incluye un diseño de gradiente funcional para equilibrar la conductividad y la resistencia al desgaste. En aplicaciones prácticas, los electrodos de aleación de plata-tungsteno ofrecen un excelente rendimiento en el procesamiento de piezas de aviación y componentes electrónicos. La selección se basa en los parámetros del proceso y los materiales de la pieza. La optimización incluye el desarrollo de un sistema de selección inteligente para mejorar la adaptabilidad.

6.2.2 Función de los materiales microelectrónicos

La aleación de plata y tungsteno desempeña un papel fundamental en el campo de la microelectrónica, especialmente en componentes de encapsulado y conexión, donde su alta conductividad y capacidad de gestión térmica satisfacen los requisitos de rendimiento de los circuitos integrados de alta densidad. La optimización de la microestructura de la aleación la adapta a los requisitos de precisión micrométrica y cumple con la tendencia de miniaturización y alta eficiencia de los dispositivos electrónicos modernos.

6.2.2.1 Requisitos de precisión para materiales en el campo de la microelectrónica

El campo de la microelectrónica exige una precisión extremadamente alta en los materiales para facilitar la fabricación y el funcionamiento de componentes micrométricos y garantizar la eficiencia y la fiabilidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de los equipos. Este requisito de precisión afecta directamente el rendimiento del encapsulado y la conexión, y debe satisfacerse mediante las propiedades del material.

La precisión dimensional es un requisito fundamental. Los materiales deben lograr un procesamiento y ensamblaje a nivel micrométrico o incluso nanométrico para adaptarse a la estructura fina de chips y placas de circuitos. La conductividad eléctrica debe ser extremadamente alta para permitir una transmisión de señal eficiente y reducir la pérdida de señal causada por la resistencia. La conductividad térmica es clave para la gestión térmica. Los dispositivos microelectrónicos generan mucho calor durante el funcionamiento a alta densidad, y los materiales deben disiparlo rápidamente para evitar el sobrecalentamiento y las fallas.

Se requiere una alta estabilidad mecánica, y el material debe resistir la tensión causada por pequeñas vibraciones y la expansión térmica para mantener su integridad estructural a largo plazo. La resistencia a la corrosión soporta la humedad o los productos químicos presentes en el entorno del empaque para evitar la degradación del rendimiento. La consistencia microestructural reduce los defectos locales y garantiza la uniformidad de las propiedades eléctricas y térmicas. Sus bajas propiedades magnéticas evitan las interferencias electromagnéticas y son adecuadas para componentes electrónicos de alta sensibilidad.

Estos requisitos han promovido el desarrollo de materiales de alta precisión, y la aleación de plata y tungsteno necesita optimizarse mediante su preparación para satisfacer las necesidades de la microelectrónica.

6.2.2.2 Aplicación de la aleación de plata y tungsteno en el encapsulado microelectrónico

La aleación de plata y tungsteno se utiliza ampliamente en el encapsulado microelectrónico. Su conductividad térmica y estabilidad dimensional favorecen la gestión térmica y la fiabilidad estructural de los chips de alto rendimiento, mejorando así la eficiencia del encapsulado.

La aleación de plata y tungsteno se utiliza como sustrato de empaquetado. La conductividad térmica la proporciona la red de fase de plata, que dispersa rápidamente el calor generado por el funcionamiento del chip y evita el sobrecalentamiento local. El alto punto de fusión y el bajo coeficiente de expansión térmica del tungsteno garantizan la estabilidad dimensional, se ajustan a las características de expansión térmica de los chips de silicio y reducen la tensión del empaquetado. Tras la optimización de la microestructura, la aleación presenta alta densidad, baja porosidad, mayor resistencia mecánica y es adecuada para empaquetados de alta densidad.

En el encapsulado de semiconductores de potencia, se utilizan sustratos de aleación de plata-tungsteno para soportar MOSFET e IGBT. Presentan una mejor conductividad térmica que los sustratos cerámicos tradicionales y mejoran la eficiencia de disipación de calor en más de un 30 %. Los polvos a escala nanométrica refinan los granos, mejoran las vías de conducción térmica y se adaptan a aplicaciones de alta potencia. La planitud de la superficie se logra mediante un pulido de precisión para cumplir con los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

requisitos de ensamblaje a nivel micrométrico. En aplicaciones prácticas, el encapsulado de aleación de plata y tungsteno ofrece un buen rendimiento en chips 5G y módulos de control de vehículos de nueva energía, con importantes efectos en la gestión térmica. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de materiales con grado funcional, el equilibrio entre la conductividad térmica y el coste, o la mejora de la resistencia a la corrosión mediante recubrimientos.

6.2.2.3 El papel de la aleación de plata y tungsteno en los componentes de conexión microelectrónica

La aleación de plata-tungsteno desempeña un papel importante en los componentes de conexión microelectrónica. Su alta conductividad y resistencia al desgaste garantizan la fiabilidad de la transmisión de señales y la conexión mecánica, adaptándose a la tendencia de miniaturización. La aleación de plata-tungsteno se utiliza para conectar cables y contactos. La alta conductividad de la fase de plata garantiza una transmisión de señales de baja resistencia y satisface las necesidades de transmisión de datos a alta velocidad. La alta dureza del tungsteno resiste el desgaste mecánico y prolonga la vida útil de los componentes de conexión, especialmente en entornos de conexión y desconexión frecuentes. La microestructura compacta reduce la porosidad, mejora la resistencia a la corrosión y se adapta a entornos húmedos o industriales. En microconectores, los contactos de aleación de plata-tungsteno son compatibles con las interfaces USB-C y HDMI, con mejor conductividad y resistencia al desgaste que las aleaciones de cobre, y la resistencia de contacto se reduce en un 20 %. Las aleaciones a escala nanométrica refinan los límites de grano, mejoran la estabilidad mecánica y reducen el desgaste de la conexión. Sus propiedades no magnéticas evitan las interferencias electromagnéticas y son adecuadas para la transmisión de señales de alta frecuencia. En aplicaciones prácticas, los componentes de conexión de aleación de plata-tungsteno ofrecen un buen rendimiento en smartphones y dispositivos IoT, con alta integridad de señal y una vida útil prolongada. Las líneas de optimización incluyen el ajuste de la relación plata-tungsteno para mejorar la conductividad o la mejora de las propiedades antioxidantes mediante un tratamiento superficial.

6.2.3 Exploración de aplicaciones en sensores

La aplicación de la aleación de plata-tungsteno en sensores ha demostrado su potencial en dispositivos electrónicos de alto rendimiento, especialmente en entornos que requieren alta conductividad y durabilidad. La optimización de la microestructura de la aleación la adapta a diversos entornos de trabajo de sensores, satisface las necesidades de transmisión de señales y estabilidad estructural, y abre una nueva dirección para el desarrollo de la tecnología de sensores.

6.2.3.1 Entorno de trabajo del sensor y requisitos de rendimiento del material

El entorno de trabajo de los sensores es complejo y diverso, con temperaturas extremas, estrés mecánico y corrosión química, lo que impone exigencias específicas a las propiedades del material para garantizar su precisión y fiabilidad a largo plazo. El entorno y los requisitos guían directamente la selección y optimización del material.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los entornos de trabajo incluyen entornos de alta temperatura, como motores de automóviles u hornos industriales, donde las temperaturas pueden superar los 200 °C; y entornos de baja temperatura, como equipos de aviación, donde las temperaturas caen por debajo de los -50 °C. Las vibraciones mecánicas y los impactos son comunes en equipos de monitorización industrial o móviles, y los entornos húmedos o con gases corrosivos, como el océano o las plantas químicas, pueden acelerar la degradación de los materiales. La interferencia electromagnética es inevitable en la transmisión de señales de alta frecuencia, y la luz ultravioleta o la radiación afectan la estabilidad de los materiales en aplicaciones exteriores.

Los requisitos de rendimiento del material incluyen alta conductividad para una transmisión eficiente de la señal y la reducción del ruido causado por la resistencia. Resistencia a altas y bajas temperaturas para adaptarse a entornos extremos y evitar que el rendimiento del material se vea afectado por los cambios de temperatura. Resistencia mecánica y al desgaste para resistir vibraciones e impactos y prolongar la vida útil del sensor. Resistencia a la corrosión para soportar medios húmedos o químicos y mantener el rendimiento eléctrico. Bajo coeficiente de expansión térmica para adaptarse a los elementos del sensor y reducir la tensión térmica. Las propiedades no magnéticas para evitar interferencias electromagnéticas, la consistencia microestructural para reducir defectos locales y una preparación optimizada son clave.

6.2.3.2 Posibles escenarios de aplicación de la aleación de plata y tungsteno en sensores

Los posibles escenarios de aplicación de la aleación de plata y tungsteno en sensores dependen de sus excelentes propiedades, especialmente en conductividad, durabilidad y adaptabilidad ambiental, lo que brinda posibilidades para el desarrollo de sensores de temperatura, presión y deformación. En sensores de alta temperatura, la aleación de plata-tungsteno se utiliza para las piezas de contacto de termopares o sensores infrarrojos. La alta conductividad de la fase de plata garantiza la transmisión de la señal, y el alto punto de fusión y la resistencia a altas temperaturas del tungsteno permiten su uso en entornos superiores a 200 °C. Tras la optimización de la microestructura, la aleación presenta una alta densidad y un bajo coeficiente de expansión térmica, adaptándose al sustrato cerámico y reduciendo la tensión térmica. Pruebas reales demuestran que la aleación se mantiene estable a altas temperaturas y es adecuada para la monitorización de motores de aeronaves. En sensores de presión, la aleación de plata-tungsteno se utiliza como película o contacto conductor, y su dureza y resistencia al desgaste resisten los impactos mecánicos y prolongan su vida útil. La conductividad térmica de la plata dispersa el calor local, y el esqueleto de tungsteno proporciona soporte mecánico, lo cual es adecuado para sistemas hidráulicos industriales. La sinterización optimizada reduce la porosidad y mejora la resistencia a la corrosión, lo cual es adecuado para la monitorización de la presión en entornos marinos. En sensores de deformación, la aleación de plata-tungsteno se utiliza para las vías conductoras, y sus propiedades no magnéticas evitan las interferencias electromagnéticas, lo cual es adecuado para la adquisición de señales de alta frecuencia.

6.3 Aplicación de la aleación de tungsteno y plata en la industria aeroespacial

La aleación de plata y tungsteno ha atraído gran atención en el sector aeroespacial debido a su alta densidad, alto punto de fusión y excelentes propiedades mecánicas. Se utiliza ampliamente en toberas de cohetes sólidos, contrapesos y sistemas de protección térmica. Su microestructura y propiedades físicas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la hacen adaptable a entornos extremos y contribuyen a la fiabilidad operativa y a la mejora del rendimiento de las naves espaciales.

6.3.1 Aplicación del revestimiento de garganta de tobera de cohete sólido

La aleación de plata y tungsteno utilizada en el revestimiento de garganta de toberas de cohetes sólidos demuestra su potencial en entornos corrosivos y de alta temperatura y presión. Como componente principal de la tobera, el revestimiento de garganta debe soportar condiciones extremas y mantener su integridad estructural. Su alta conductividad térmica y resistencia al desgaste le confieren ventajas únicas en este campo.

6.3.1.1 Entorno de trabajo y desafíos materiales del revestimiento de garganta de tobera de cohetes sólidos

El entorno de trabajo del revestimiento de garganta de la boquilla del cohete sólido es extremadamente severo, involucra alta temperatura, flujo de gas a alta velocidad y erosión química, lo que representa un desafío importante para las propiedades del material y afecta directamente la vida útil de la boquilla y el rendimiento del cohete.

El entorno de trabajo incluye altas temperaturas, donde la temperatura de los gases de combustión puede superar los 3000 °C, y el revestimiento de la garganta debe resistir choques térmicos. El flujo de gas a alta velocidad impacta el revestimiento de la garganta a velocidades supersónicas, transportando partículas y causando desgaste mecánico y erosión. La erosión química es causada por productos de combustión como cloruro de hidrógeno y óxidos, lo que acelera la degradación del material. Los ciclos térmicos y la tensión mecánica se intensifican durante el lanzamiento y la reentrada, y los rayos ultravioleta y la radiación afectan aún más la estabilidad del material en el entorno espacial.

Los desafíos del material incluyen la resistencia a altas temperaturas, que debe soportar temperaturas superiores a 3000 °C sin fundirse ni deformarse. La resistencia a la erosión, para absorber partículas a alta velocidad, y la corrosión química para evitar la pérdida de superficie. La resistencia mecánica y al desgaste contribuyen a la integridad estructural y prolongan la vida útil. El bajo coeficiente de expansión térmica, compatible con otros componentes de la boquilla, reduce la tensión térmica. La conductividad térmica dispersa el calor y previene el sobrecalentamiento local. La consistencia microestructural, para reducir la propagación de grietas, y la preparación optimizada son clave.

6.3.1.2 Rendimiento de la aleación de plata y tungsteno como revestimiento de garganta de boquilla

La aleación de plata y tungsteno ofrece un rendimiento excepcional como revestimiento de garganta de tobera. El efecto sinérgico de la fase de plata y la fase de tungsteno cumple con los requisitos de alta temperatura y entornos corrosivos, y contribuye al funcionamiento eficiente del cohete. La resistencia a altas temperaturas se debe al alto punto de fusión del tungsteno (3422 °C). Esta aleación mantiene su estabilidad estructural por encima de los 3000 °C, y la conductividad térmica de la fase de plata dispersa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rápidamente el calor para evitar la fusión localizada. Las pruebas demuestran que la tasa de pérdida de los revestimientos de garganta de aleación de plata-tungsteno en entornos simulados de alta temperatura es menor que la de los materiales de carburo. La resistencia a la corrosión se debe a la dureza y resistencia química del tungsteno; el desgaste superficial se reduce bajo flujos de gas a alta velocidad e impacto de partículas, y la humectabilidad de la plata mejora la unión de la interfaz.

La resistencia mecánica y al desgaste se sustentan en el esqueleto de tungsteno, y la aleación resiste ciclos térmicos y tensiones mecánicas, prolongando la vida útil del revestimiento de garganta. El bajo coeficiente de expansión térmica (similar al de los materiales cerámicos) reduce la discordancia de tensiones con otras partes de la boquilla, y la microestructura optimizada presenta una alta densidad y reduce la propagación de grietas. La red de plata proporciona conductividad térmica y distribuye el calor uniformemente para evitar fallos por sobrecalentamiento.

En aplicaciones prácticas, los revestimientos de garganta de aleación de plata-tungsteno ofrecen un buen rendimiento en cohetes sólidos, especialmente en motores de alto empuje, donde la durabilidad mejora significativamente. Las líneas de optimización incluyen el ajuste de la relación plata-tungsteno para mejorar la conductividad térmica o la mejora de la resistencia a la erosión química mediante un recubrimiento.

6.3.1.3 Preparación y efecto de aplicación del revestimiento de garganta de boquilla de aleación de plata y tungsteno

El revestimiento de garganta de boquilla de aleación de plata-tungsteno se prepara mediante pulvimetalurgia o infiltración al vacío. El proceso de preparación y su efecto de uso influyen directamente en su rendimiento y aplicación práctica.

El proceso de preparación incluye la preparación del polvo, la selección de polvo de tungsteno y plata de alta pureza, y el refinamiento del tamaño de partícula mediante molienda de bolas de alta energía para garantizar su uniformidad. El moldeo por prensado utiliza alta temperatura y alta presión, y la presión de moldeo se ajusta a cientos de MPa, logrando una alta densidad del cuerpo moldeado. La sinterización se realiza al vacío o en atmósfera inerte, a una temperatura ligeramente superior al punto de fusión de la plata. La plata líquida humedece las partículas de tungsteno y rellena los poros. El esqueleto poroso de tungsteno se prepara mediante el método de infiltración al vacío, y la plata fundida se infiltra para formar una estructura densa. El tratamiento térmico posterior optimiza la microestructura.

El efecto del uso se refleja en una alta durabilidad y estabilidad de rendimiento. El revestimiento de garganta optimizado presenta baja porosidad y mejor resistencia a la corrosión que los materiales de grafito tradicionales. Las pruebas de alta temperatura demuestran que el revestimiento de garganta funciona durante cientos de segundos a 3000 °C, y el daño superficial es solo un tercio del de los materiales de carburo. La resistencia mecánica soporta múltiples ciclos térmicos, y la conductividad térmica garantiza una distribución uniforme del calor y reduce las fallas locales. En lanzamientos reales de cohetes, el revestimiento de garganta de aleación de plata y tungsteno presenta una baja pérdida de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

empuje y su vida útil se extiende hasta 1,5 veces más que la de los materiales tradicionales. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de combinaciones multiproceso como SPS+HIP, o la mejora de la densidad mediante nanopulvos. Los efectos de preparación y uso brindan soporte técnico para la aplicación de la aleación de plata-tungsteno en revestimientos de gargantas de boquillas.

6.3.2 Aplicaciones potenciales de los componentes de motores de aeronaves

La posible aplicación de la aleación de plata y tungsteno en componentes de motores aeroespaciales refleja su adaptabilidad a entornos de alta temperatura y alta presión, especialmente en entornos con altos requisitos de gestión térmica, soporte estructural y durabilidad. La conductividad térmica y las propiedades mecánicas de la aleación permiten su aplicación en componentes clave de motores aeroespaciales, mejorando la eficiencia y la vida útil del motor.

6.3.2.1 Requisitos para los materiales en el entorno de trabajo de alta temperatura y alta presión de los motores de aeronaves

El entorno de trabajo de alta temperatura y alta presión de los motores de aviación es extremadamente complejo, lo que impone estrictos requisitos de rendimiento de los materiales para garantizar la fiabilidad y seguridad del motor en operaciones de alto rendimiento. El entorno y los requisitos guían directamente la selección y optimización de los materiales. El entorno de trabajo incluye zonas de alta temperatura, donde la cámara de combustión y los álabes de la turbina pueden alcanzar temperaturas de entre 1500 °C y 2000 °C, e incluso más altas en la tobera de escape. En entornos de alta presión, la presión de trabajo puede alcanzar decenas de MPa, y el caudal de gas es supersónico, lo que genera tensión mecánica. Los ciclos térmicos son frecuentes durante el despegue y el aterrizaje, y la oxidación y la corrosión son causadas por productos de combustión como el dióxido de carbono y el vapor de agua. La vibración y la fuerza centrífuga se intensifican en las piezas giratorias de alta velocidad, y la radiación y las fuerzas externas afectan la estabilidad del material durante el vuelo a gran altitud.

Los requisitos del material incluyen resistencia a altas temperaturas para mantener la integridad estructural por encima de 2000 °C. Resistencia a la oxidación y la corrosión para resistir el ataque químico y prevenir la degradación superficial. Resistencia mecánica y al desgaste para soportar operaciones a alta presión y alta velocidad, y prolongar la vida útil del componente. Bajo coeficiente de expansión térmica para ser compatible con otros materiales y reducir la tensión térmica. Conductividad térmica para dispersar el calor y prevenir el sobrecalentamiento local. Consistencia microestructural para reducir la propagación de grietas y una preparación optimizada es clave.

6.3.2.2 Potencial de aplicación de la aleación de plata y tungsteno en componentes específicos de motores de aeronaves

El potencial de aplicación de la aleación de plata y tungsteno en partes específicas de motores de aeronaves se basa en sus excelentes propiedades, especialmente en conductividad térmica a alta temperatura y soporte mecánico, brindando posibilidades para álabes de turbinas, revestimientos de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cámaras de combustión e intercambiadores de calor. En los álabes de turbinas, se utiliza una aleación de plata y tungsteno como material de refuerzo. El alto punto de fusión del tungsteno permite resistir temperaturas superiores a 1500 °C, y la conductividad térmica de la plata dispersa el calor para evitar el sobrecalentamiento local. El bajo coeficiente de expansión térmica reduce el desajuste de tensiones con las aleaciones a base de níquel, y la alta resistencia mecánica, tras optimizar la microestructura, resulta adecuada para entornos de rotación a alta velocidad. Las pruebas demuestran que la tasa de deformación de los álabes de aleación bajo altas temperaturas simuladas es menor que la de los materiales tradicionales.

En el revestimiento de la cámara de combustión, la aleación de plata y tungsteno proporciona resistencia a altas temperaturas y protección contra la erosión. El esqueleto de tungsteno puede soportar temperaturas de hasta 2000 °C, y la red de fase de plata conduce el calor uniformemente, reduciendo la tensión térmica. La resistencia a la oxidación es superior a la de la plata pura, y su estructura densa reduce la penetración de medios corrosivos, lo que resulta adecuado para entornos de combustión prolongada. En estudios de aplicaciones reales, se ha mejorado la durabilidad del revestimiento y se ha ampliado el intervalo de mantenimiento. En intercambiadores de calor, se utiliza una aleación de plata-tungsteno para las piezas conductoras de calor. La alta conductividad eléctrica y térmica de la plata favorece una transferencia de calor eficiente, y la estabilidad del tungsteno mejora la durabilidad mecánica. Tras optimizar la microestructura, la porosidad se reduce y la eficiencia térmica mejora, lo que resulta adecuado para los sistemas de refrigeración de aeronaves. El polvo a escala nanométrica refina los granos y mejora la conducción del calor.

En una evaluación real, la aleación de tungsteno y plata tiene un buen desempeño en componentes de alta temperatura, especialmente en motores a reacción militares y comerciales, con una vida útil y una eficiencia mejoradas.

6.4 Aplicación de la aleación de plata y tungsteno en otros campos

La aleación de plata-tungsteno ha demostrado un amplio potencial de aplicación en los campos de la metalurgia, la medicina y la energía gracias a su excelente conductividad, resistencia a altas temperaturas y propiedades mecánicas. Su microestructura y propiedades físicas la hacen adaptable a condiciones de trabajo extremas y facilita la mejora e innovación en diversas necesidades industriales. A continuación, se detallarán los escenarios de aplicación de la aleación de plata-tungsteno en la industria metalúrgica, analizando específicamente las condiciones de trabajo y los requisitos de materiales de los equipos metalúrgicos, su aplicación en electrodos de hornos metalúrgicos y su uso en instrumentos de prueba metalúrgicos.

6.4.1 Escenarios de aplicación en la industria metalúrgica

La aleación de plata y tungsteno tiene un importante valor aplicativo en la industria metalúrgica gracias a su alta conductividad y durabilidad, especialmente en electrodos de hornos e instrumentos de detección. Su alto punto de fusión y resistencia a la corrosión facilitan la fundición y la medición a alta temperatura, mejorando así la eficiencia y la fiabilidad de los procesos metalúrgicos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4.1.1 Condiciones de trabajo y requisitos materiales de los equipos metalúrgicos

Las condiciones de trabajo de los equipos metalúrgicos son extremadamente rigurosas, con altas temperaturas, alta corriente y corrosión química. Esto impone estrictos requisitos de rendimiento del material para garantizar la estabilidad y la vida útil del equipo. Las condiciones y los requisitos guían directamente la selección y optimización del material.

Las condiciones de trabajo incluyen entornos de alta temperatura. Los hornos de arco y los hornos de inducción pueden alcanzar temperaturas superiores a 1800 °C, altas densidades de corriente a través de los electrodos y corrientes de hasta decenas de miles de amperios. El ataque químico es causado por el metal fundido y la escoria, y la oxidación y la sulfuración aceleran la degradación del material. El estrés mecánico y los ciclos térmicos se ven exacerbados por el funcionamiento frecuente, y el polvo y la humedad en el ambiente industrial afectan aún más la estabilidad del material.

Los requisitos del material incluyen resistencia a altas temperaturas, manteniendo la integridad estructural por encima de 1800 °C. Una alta conductividad facilita la transmisión eficiente de la corriente y reduce la pérdida de energía. La resistencia a la corrosión y la oxidación resiste el ataque químico y previene la pérdida de superficie. La resistencia mecánica y al desgaste soportan altas corrientes e impactos mecánicos, prolongando así su vida útil. Un bajo coeficiente de expansión térmica reduce la tensión térmica, la consistencia microestructural reduce las fallas locales y la preparación optimizada es clave.

6.4.1.2 Aplicación de aleación de plata y tungsteno en electrodos de hornos metalúrgicos

La aplicación de la aleación de plata-tungsteno en electrodos de hornos metalúrgicos demuestra su rendimiento superior en entornos de alta temperatura y alta corriente, mejorando la eficiencia operativa de hornos de arco y de inducción. La alta conductividad de la fase de plata proporciona una trayectoria de baja resistencia, permite la transmisión de decenas de miles de amperios de corriente y reduce el calentamiento del electrodo y la pérdida de energía. El alto punto de fusión del tungsteno (3422 °C) resiste temperaturas superiores a 1800 °C. La aleación se mantiene estable bajo la acción del arco y presenta una mayor resistencia a la oxidación que la plata pura. Tras optimizar la microestructura, la estructura densa reduce la porosidad, mejora la resistencia a la corrosión y se adapta al entorno de metal fundido y escoria.

La resistencia mecánica y al desgaste se sustentan en el esqueleto de tungsteno, y el electrodo resiste impactos mecánicos y desgaste a largo plazo, prolongando así su vida útil. La conductividad térmica de la plata dispersa el calor, previene el sobrecalentamiento local y optimiza la uniformidad de la superficie del electrodo tras la sinterización. En aplicaciones prácticas, los electrodos de aleación de plata y tungsteno ofrecen un buen rendimiento en la fundición de acero y metales no ferrosos, con una eficiencia de corriente superior al 10 % y una tasa de pérdida inferior a la de los electrodos de grafito. Las direcciones de optimización incluyen el ajuste de la relación plata-tungsteno para mejorar la conductividad o mejorar la resistencia a la corrosión química a través del recubrimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4.1.3 Uso de aleación de plata y tungsteno en instrumentos de pruebas metalúrgicas

El uso de aleación de plata y tungsteno en instrumentos de pruebas metalúrgicas se basa en su alta conductividad y durabilidad para favorecer la medición y transmisión de señales precisas y mejorar la confiabilidad de la detección.

En termopares de alta temperatura, se utiliza una aleación de plata-tungsteno como contacto conductor. La fase de plata garantiza una transmisión de señal de baja resistencia, y el alto punto de fusión del tungsteno permite mediciones a temperaturas ambientales de 1800 °C. La densidad microestructural reduce la deriva del potencial termoelectrónico, y la estabilidad mejora tras una sinterización optimizada, lo que resulta adecuado para la monitorización de la temperatura en hornos metalúrgicos. Las pruebas demuestran que la precisión de los termopares de aleación es superior a la de las aleaciones tradicionales de platino-rodio. En las sondas de prueba de resistividad, la aleación de plata-tungsteno proporciona un contacto fiable, la dureza y la resistencia al desgaste resisten el desgaste mecánico, y la red de plata facilita una distribución eficiente de la corriente. La resistencia a la corrosión se adapta a la pulverización catódica de metal fundido, y el polvo a escala nanométrica refina los límites de grano y mejora la consistencia de la medición. En aplicaciones prácticas, la sonda ofrece un buen rendimiento en la detección de pureza del metal, con una reducción de error del 5 %.

Las direcciones de optimización incluyen el desarrollo de diseños de gradientes funcionales para mejorar la resistencia a altas temperaturas o mejorar los efectos antioxidantes a través del tratamiento de superficies.

6.4.2 Casos de uso en equipamiento deportivo

El uso de aleaciones de plata y tungsteno en equipamiento deportivo demuestra su potencial en equipos de alto rendimiento, especialmente en entornos que requieren alta densidad y durabilidad. La alta resistencia y la distribución del peso de la aleación facilitan el diseño y la fabricación de equipamiento deportivo de alta gama, mejorando el rendimiento de los atletas y la vida útil del equipo.

6.4.2.1 Requisitos para las propiedades de los materiales de equipamiento deportivo de alta gama

Los equipos deportivos de alta gama exigen altas propiedades de los materiales para garantizar un funcionamiento preciso, durabilidad y una distribución optimizada del peso, garantizando así la ventaja competitiva de los atletas. Estas exigencias guían directamente la selección y optimización de materiales. Entre ellas, se incluyen la alta densidad para proporcionar un peso centralizado que optimice el equilibrio y la inercia de los equipos, como cabezas de golf o pesas de pesca. La resistencia mecánica y al desgaste para resistir el uso frecuente y los impactos, prolongando así la vida útil del equipo. La resistencia a la corrosión para resistir entornos exteriores, como la lluvia o el agua de mar, previene la degradación del rendimiento. La precisión del procesamiento permite formas complejas y estructuras finas para adaptarse a diseños de alta gama. Un bajo coeficiente de expansión térmica reduce la deformación causada por los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cambios de temperatura, la consistencia microestructural reduce los defectos locales y una preparación optimizada es clave.

6.4.2.2 Aplicación de aleación de plata y tungsteno en cabezas de golf, aparejos de pesca y otros equipos

La aplicación de la aleación de plata-tungsteno en equipos deportivos, como cabezas de golf y aparejos de pesca, se basa en su alta densidad y propiedades mecánicas para mejorar el rendimiento y la durabilidad del equipo. En las cabezas de golf, la aleación de plata-tungsteno se utiliza como contrapeso. Su alta densidad (aprox. $19,3 \text{ g/cm}^3$) proporciona una masa centralizada, optimiza la inercia del punto de impacto y mejora la distancia y la precisión del golpe. La alta dureza del tungsteno resiste las colisiones frecuentes entre la cabeza y la bola, prolongando su vida útil. La conductividad térmica de la plata dispersa el calor del impacto y la microestructura, tras la optimización, presenta una alta densidad, lo que reduce el desgaste. En la práctica, la estabilidad de golpeo de la cabeza de aleación de plata-tungsteno es superior a la de la aleación de titanio, siendo la preferida por los jugadores profesionales.

En aparejos de pesca, la aleación de plata y tungsteno se utiliza para plomos de peso y componentes de anzuelos. Su alta densidad garantiza un lance preciso y un hundimiento hasta el fondo, y su resistencia al desgaste resiste las corrientes de agua y el desgaste de las rocas. La resistencia a la corrosión de la plata se adapta al entorno marino, y la sinterización optimizada reduce la porosidad y mejora la estabilidad a largo plazo. El polvo a escala nanométrica refina los límites de grano y mejora la consistencia mecánica, lo que lo hace adecuado para equipos de pesca de alta gama. Las pruebas demuestran que los plomos de aleación son más duraderos en agua salada que los productos de plomo.

6.4.3 Exploración y aplicación en el campo de los dispositivos médicos

La exploración y aplicación de la aleación de plata y tungsteno en el campo de los dispositivos médicos demuestra su potencial en entornos especiales y de alta precisión, especialmente en equipos de imagenología e instrumental quirúrgico. La alta densidad y conductividad de la aleación impulsan el desarrollo de tecnología médica avanzada y mejoran la eficiencia y la seguridad del diagnóstico y el tratamiento.

6.4.3.1 Requisitos de biocompatibilidad de los materiales y rendimiento de los productos sanitarios

Los dispositivos médicos tienen requisitos estrictos de biocompatibilidad y rendimiento de los materiales para garantizar la seguridad humana y la funcionalidad del equipo, así como para satisfacer las diversas necesidades de las aplicaciones clínicas. Estos requisitos guían directamente la selección y optimización de materiales.

La biocompatibilidad es un requisito fundamental. El material debe ser atóxico, hipoalérgico y no causar inflamación ni rechazo al entrar en contacto con tejido o sangre humana. La resistencia a la corrosión debe ser compatible con fluidos corporales o entornos desinfectantes para evitar la degradación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del rendimiento. La resistencia mecánica y al desgaste facilitan las operaciones de precisión y el uso a largo plazo, prolongando así la vida útil del dispositivo. La precisión de procesamiento permite que las estructuras micrométricas se adapten a diseños médicos complejos. La conductividad facilita funciones eléctricas, como la transmisión de señales en equipos de imagenología o quirúrgicos. La resistencia a altas temperaturas se adapta al proceso de desinfección, y la consistencia microestructural reduce los defectos locales. Una preparación optimizada es clave.

6.4.3.2 Aplicación de aleación de plata y tungsteno en equipos de imágenes médicas

La exploración de aplicaciones de la aleación de plata-tungsteno en equipos de diagnóstico por imágenes se basa en su alta densidad y conductividad para obtener imágenes de alta precisión en radiografías y tomografías computarizadas. En los objetivos de los tubos de rayos X, la aleación de plata-tungsteno se utiliza como material anódico. Su alta densidad (aproximadamente $19,3 \text{ g/cm}^3$) mejora la eficiencia de la generación de rayos X, y el alto punto de fusión del tungsteno (3422°C) resiste la alta temperatura del bombardeo con haces de electrones. La conductividad térmica de la plata dispersa el calor para evitar el sobrecalentamiento de la superficie del objetivo. Tras optimizar su microestructura, presenta una alta densidad y reduce las grietas. Las pruebas demuestran que la claridad de imagen del objetivo de la aleación mejora en un 15 % en el escaneo de alta potencia, lo que resulta adecuado para diagnósticos de alta resolución. En el blindaje de detectores de TC, la aleación de plata-tungsteno proporciona un blindaje de alta densidad, reduce la radiación dispersa y protege a los pacientes y al equipo. La resistencia a la corrosión de la plata se adapta al entorno de esterilización, y la estabilidad del tungsteno mejora la durabilidad mecánica. El polvo a escala nanométrica refina los límites de grano y mejora la uniformidad del blindaje. La investigación demuestra que su efecto de protección radiológica es superior al de los materiales a base de plomo.

6.4.3.3 Posibles aplicaciones de la aleación de plata y tungsteno en instrumentos quirúrgicos de precisión

El potencial de la aleación de plata-tungsteno en instrumental quirúrgico de precisión se basa en su alta dureza y conductividad, lo que facilita la cirugía mínimamente invasiva y la electrocirugía. En los bisturíes mínimamente invasivos, se utiliza aleación de plata-tungsteno como hoja. La alta dureza del tungsteno resiste el desgaste durante el corte de tejido y prolonga su vida útil. La conductividad de la plata facilita la función del bisturí electroquirúrgico. Tras optimizar la microestructura, la densidad es alta y se reduce la adhesión tisular. El pulido de la superficie logra una nitidez micrométrica. La investigación demuestra que la precisión de corte es superior a la del acero inoxidable, lo que resulta adecuado para la neurocirugía.

En los electrodos electroquirúrgicos, la aleación de plata-tungsteno proporciona una transmisión de corriente eficiente, la red de fase de plata reduce la resistencia y el esqueleto de tungsteno resiste la ablación por arco y se adapta a la resección a alta temperatura. La resistencia a la corrosión es buena para la sangre y los desinfectantes, y la aleación a escala nanométrica refina el límite de grano y mejora la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

consistencia mecánica. En pruebas reales, el electrodo presenta alta estabilidad y baja tasa de daño en cirugía de alta frecuencia.

6.4.4 Perspectivas de aplicación en el campo de la energía nuclear

Las perspectivas de aplicación de la aleación de plata y tungsteno en el campo de la energía nuclear reflejan su potencial en entornos extremos y de alta radiación, especialmente en componentes de reactores nucleares y blindaje radiológico. Su alta densidad y durabilidad permiten su aplicación en equipos de energía nuclear, lo que contribuye a la seguridad y la eficiencia de la tecnología nuclear.

6.4.4.1 Requisitos de resistencia a la radiación de los materiales y otras propiedades para equipos de energía nuclear

Los equipos de energía nuclear tienen requisitos extremadamente altos en cuanto a la resistencia a la radiación y otras propiedades de los materiales para garantizar un funcionamiento estable a largo plazo en entornos de alta radiación y alta temperatura, y para cumplir con los requisitos de seguridad y eficiencia nuclear. Estos requisitos guían directamente la selección y optimización de materiales.

El entorno de trabajo incluye campos de alta radiación. La radiación de rayos gamma y neutrones puede causar envejecimiento del material o cambios estructurales. La corrosión química es causada por refrigerantes como el sodio líquido o el agua pesada, y las condiciones de alta presión intensifican la tensión mecánica. Los ciclos térmicos y las vibraciones son frecuentes durante el funcionamiento, y la interferencia electromagnética es inevitable en los sistemas de control.

Los requisitos del material incluyen resistencia a la radiación para resistir la captura de neutrones y la degradación inducida por rayos gamma, y mantener la estabilidad a largo plazo. Resistencia a altas temperaturas para adaptarse a entornos superiores a 700 °C y prevenir deformaciones o fallos. Resistencia a la corrosión para soportar refrigerantes y productos de radiación y evitar la pérdida de superficie. Resistencia mecánica y al desgaste para soportar altas presiones y vibraciones, y prolongar la vida útil. Alta densidad para el blindaje contra la radiación y reducir la exposición externa. La consistencia microestructural reduce la propagación de grietas, y una preparación optimizada es clave.

6.4.4.2 Análisis de la posibilidad de aplicación de la aleación de plata-tungsteno en el campo de la energía nuclear

Las posibilidades de aplicación de la aleación de plata y tungsteno en el campo de la energía nuclear dependen de su alta densidad y durabilidad, mostrando especialmente potencial en protección contra la radiación y en componentes de alta temperatura para apoyar el funcionamiento seguro de los reactores nucleares.

En el blindaje radiológico, la alta densidad de la aleación de plata-tungsteno (aprox. 19,3 g/cm³) absorbe eficazmente los rayos gamma y la radiación de neutrones, la resistencia a la radiación del tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reduce el envejecimiento del material y la conductividad térmica de la plata dispersa el calor. Tras optimizar la microestructura, la densidad es alta y la eficiencia de blindaje es superior a la de los materiales a base de plomo, lo que resulta adecuado para carcasas de reactores nucleares o contenedores de transporte. Las pruebas demuestran que el espesor del blindaje de la aleación puede reducirse en un 10 % sin que se descuelguen los estándares de protección.

En componentes de alta temperatura, se utiliza una aleación de plata y tungsteno para los manguitos de las barras de control. El alto punto de fusión del tungsteno (3422 °C) puede soportar entornos de 700 °C. La red de fase de plata favorece la conductividad, optimiza la sinterización para reducir la porosidad y mejora la resistencia a la corrosión. La resistencia mecánica soporta condiciones de alta presión, y el polvo a escala nanométrica refina los límites de grano y mejora la durabilidad. Durante la exploración, el manguito presenta una alta estabilidad bajo radiación simulada de alta temperatura y es adecuado para reactores de neutrones rápidos.

En los conectores de sistemas de refrigeración, la aleación de plata y tungsteno proporciona conductividad y soporte mecánico fiables, resistencia a la corrosión para adaptarse al entorno de sodio líquido y dureza para resistir el desgaste por vibración. La consistencia de la microestructura reduce los defectos, y las líneas de optimización incluyen el desarrollo de recubrimientos resistentes a la radiación.

En la evaluación de viabilidad actual, las aleaciones de plata-tungsteno han demostrado potencial en centrales nucleares y el tratamiento de residuos nucleares, y su resistencia a la radiación y a las altas temperaturas es superior a la de las aleaciones tradicionales. Las líneas de optimización incluyen ajustar la relación plata-tungsteno para mejorar el efecto de blindaje o mejorar la resistencia a la corrosión mediante materiales compuestos.



CTIA GROUP LTD Aleación de tungsteno y plata

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Silver Tungsten Alloy Introduction

1. Overview of Silver Tungsten Alloy

Silver tungsten alloy is an alloy material primarily composed of silver and tungsten, where silver serves as the matrix or binding phase and tungsten acts as the high-melting-point reinforcing phase, combining the advantages of both to create a material with excellent performance.

2. Features of Silver Tungsten Alloy

The composition ratio of silver-tungsten alloy is adjustable; a higher silver content enhances its electrical and thermal conductivity, making it suitable for high-voltage electrical contacts, while a higher tungsten content improves its high-temperature resistance and wear resistance, making it ideal for welding electrodes and high-temperature components.

3. The Composition Ratio of Silver Tungsten Alloy

Materials	Composition (%weight)	Density (/g.cm3)	Electrical conductivity	Electrical resistivity	Hardness (HB)
AgW30	70 silver 30 tungsten	11.8-12.2	73	2.3	75
AgW40	60 silver 40 tungsten	12.5-12.8	64	2.6	85
AgW50	50 silver 50 tungsten	13.2-13.5	73-56	2.3-3.0	105
AgW55	45 silver 55 tungsten	13.6-13.9	54	3.2	115
AgW60	40 silver 60 tungsten	14.0-14.4	60-50	2.8-3.3	125
AgW65	35 silver 65 tungsten	14.5-14.9	50	3.4	135
AgW70	30 silver 70 tungsten	14.7-15.1	48	3.5	150
AgW80	20 silver 80 tungsten	16.1-16.5	37	4.5	180

4. Production Methods for Silver Tungsten Alloy

The preparation method for tungsten-silver alloy is the same as that for tungsten-copper alloy. Due to tungsten's high melting point and its inability to alloy with silver, traditional methods cannot be used. Tungsten-silver alloy is generally produced using the vacuum infiltration method, with production steps including material mixing preparation, pressing and forming, degreasing, high-temperature sintering, infiltration, and post-processing.

5. Applications of Silver Tungsten Alloy

Silver-tungsten alloy is primarily used for electrical contacts and electrode materials, such as breaker contacts, resistance welding electrodes, and plasma spray components, with its excellent electrical properties and arc resistance meeting the demands of high currents and frequent operations.

6. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: silver-tungsten.net

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Capítulo 7: Dirección de desarrollo futuro de la aleación de plata y tungsteno

Como material multifuncional, el desarrollo futuro de la aleación de plata-tungsteno se centra en nuevas tecnologías de preparación, la optimización del rendimiento y la expansión de aplicaciones. Mediante la innovación tecnológica, se mejoran la microestructura y la consistencia del rendimiento para satisfacer las crecientes necesidades industriales.

7.1 Exploración de nuevas tecnologías de preparación de aleación de plata y tungsteno

La exploración de nuevas tecnologías de preparación para aleaciones de plata y tungsteno busca superar las limitaciones de la pulvimetalurgia y los métodos de infiltración al vacío tradicionales, y mejorar la densidad, la uniformidad y la capacidad del material para fabricar formas complejas. Esta nueva tecnología combina procesos avanzados y control inteligente para facilitar la mejora del rendimiento de las aleaciones y la expansión de sus aplicaciones.

7.1.1 Aplicaciones potenciales de la tecnología de fabricación aditiva

Una tecnología de fabricación aditiva (como la impresión 3D) en la preparación de aleación de plata y tungsteno puede lograr formas geométricas complejas a través de la deposición capa por capa, mejorar la utilización del material y las capacidades de personalización. La tecnología de fusión selectiva por láser (SLM) mezcla polvo de plata y polvo de tungsteno, y luego utiliza láser para fundir y depositar, generando una estructura densa. El bajo punto de fusión de la plata (961 °C) y el alto punto de fusión del tungsteno (3422 °C) deben fusionarse uniformemente mediante la optimización de los parámetros del láser. La potencia y la velocidad de escaneo se ajustan para garantizar una distribución de fase uniforme. La observación microestructural muestra que la aleación preparada por SLM presenta granos finos y una porosidad inferior al 5 %, lo que la hace adecuada para piezas de precisión. La tecnología de Deposición Directa de Metal (DMD) es adecuada para piezas de gran tamaño. Proyecta polvo metálico fundido y se solidifica rápidamente. La alta densidad de la aleación de plata y tungsteno (aprox. 19,3 g/cm³) permite una deposición de alta precisión. La gestión térmica es clave. La conductividad térmica de la plata dispersa el calor y el esqueleto de tungsteno proporciona soporte mecánico. Las pruebas demuestran que la resistencia a la tracción de las piezas DMD aumenta un 20 %, lo que resulta ideal para la fabricación simultánea de boquillas complejas. Las posibles aplicaciones incluyen contrapesos aeroespaciales y objetivos para imágenes médicas. La fabricación aditiva reduce el desperdicio de material y el diseño personalizado mejora el rendimiento. Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de tecnología de impresión multimaterial o el refinamiento de los límites de grano mediante postratamiento térmico.

7.1.2 Perspectivas de otras tecnologías de preparación de vanguardia

Otras tecnologías de preparación de vanguardia proporcionan caminos de desarrollo diversificados para las aleaciones de plata y tungsteno, combinando nanotecnología y procesos inteligentes para mejorar el rendimiento. La tecnología de sinterización de nanopulvos utiliza polvo de tungsteno y plata de grado nanométrico con un tamaño de partícula inferior a 100 nanómetros y logra un prensado rápido a alta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperatura mediante sinterización por plasma de chispa (SPS). El tratamiento a alta temperatura y de corta duración inhibe el crecimiento del grano, con una densidad superior al 98 % y un aumento de dureza del 30 %. Es adecuada para conectores microelectrónicos, y su optimización incluye el control de la aglomeración de nanopulvos.

La tecnología de pulverización de plasma funde polvo de tungsteno y plata y lo pulveriza sobre el sustrato para formar un recubrimiento resistente al desgaste. La dureza del tungsteno mejora la resistencia al desgaste de la superficie, y la conductividad de la plata facilita las funciones eléctricas. El espesor del recubrimiento se puede controlar a nivel micrométrico. Es adecuada para la reparación de electrodos metalúrgicos y se espera que combine la monitorización inteligente para mejorar la uniformidad del recubrimiento.

La tecnología de epitaxia de haz molecular (MBE) explora la preparación de películas delgadas mediante la deposición de átomos de plata y tungsteno capa a capa para generar capas delgadas de alta pureza. Excelente conductividad y estabilidad térmica, ideal para capas sensibles a sensores. Los desafíos residen en el coste y la escala, y las líneas de optimización incluyen el desarrollo de precursores de bajo coste.

7.2 Tendencias de investigación en la optimización del rendimiento de las aleaciones de plata y tungsteno

La línea de investigación sobre la optimización del rendimiento de las aleaciones de plata-tungsteno busca mejorar su rendimiento integral mediante el diseño de materiales y la mejora de procesos para satisfacer las necesidades de diversas aplicaciones. Esta línea de investigación combina la regulación de la microestructura y la adaptación a entornos específicos para impulsar avances en aleaciones de alta tecnología.

7.2.1 Direcciones de investigación para mejorar el desempeño integral

La investigación se centra en mejorar el rendimiento integral de las aleaciones de plata y tungsteno. Mediante la optimización multidimensional, se mejoran la conductividad eléctrica, la conductividad térmica, la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión, sentando las bases para su amplia aplicación.

El refinamiento de la microestructura utiliza polvo a nanoescala y tecnología de sinterización rápida para reducir el tamaño del grano, mejorar el efecto de refuerzo del límite de grano y aumentar la dureza en más de un 20 %. La optimización de la distribución de fases ajusta la relación plata-tungsteno, la red de plata mejora la conductividad y el esqueleto de tungsteno mejora el soporte mecánico, con una conductividad de hasta un 70 % IACS. La reducción de la porosidad utiliza tecnología de prensado isostático en caliente (HIP), con una densidad del 98 %, lo que mejora la conductividad térmica y la resistencia a la corrosión. La modificación de la superficie reduce los defectos superficiales mediante pulido electroquímico o recubrimientos como el nitrato de titanio, mejora la resistencia al desgaste en un 30 % y la resistencia a la oxidación. La aleación añade oligoelementos como níquel o cobalto para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimizar la unión interfacial y equilibrar el rendimiento general. Diversos estudios han demostrado que la estabilidad de la aleación optimizada en entornos de alta temperatura mejora significativamente, lo que la hace adecuada para su uso en diversos campos. Las direcciones de optimización incluyen el desarrollo de herramientas de diseño inteligente para predecir el rendimiento o verificar la mejor relación a través de experimentos de múltiples parámetros.

7.2.2 Mejora del rendimiento para aplicaciones específicas

La mejora del rendimiento para aplicaciones específicas se centra en las necesidades personalizadas, optimiza las propiedades de la aleación de tungsteno y plata para los campos eléctrico, aeroespacial y médico, y mejora los efectos de la aplicación.

En el campo eléctrico, se mejoran la resistencia al arco y la conductividad, el contenido de tungsteno se incrementa al 70%-80%, el punto de fusión y la dureza se incrementan, la pérdida por resistencia al arco se reduce en un 40% y es adecuado para interruptores de alto voltaje. La optimización de la red de plata asegura la conductividad y la densidad de la microestructura mejora la estabilidad de la transmisión de la señal. En el campo aeroespacial, se mejoran la resistencia a altas temperaturas y la baja expansión térmica, la relación plata-tungsteno se ajusta al 50%-50%, coincidiendo con el sustrato cerámico, y el coeficiente de expansión térmica se reduce a $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Los granos a escala nanométrica mejoran la resistencia mecánica, adecuados para revestimientos de garganta de boquillas, y la durabilidad se incrementa en un 50%. En el campo médico, se mejoran la biocompatibilidad y la precisión del procesamiento, los recubrimientos de superficie como el níquel titanio mejoran la compatibilidad, los polvos a escala nanométrica refinan la estructura y la tolerancia de procesamiento alcanza ± 5 micras. La optimización de la conductividad es compatible con equipos de imagenología y se mejora la resistencia a la corrosión para adaptarse a entornos de fluidos corporales.



CTIA GROUP LTD Aleación de tungsteno y plata

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Silver Tungsten Alloy Introduction

1. Overview of Silver Tungsten Alloy

Silver tungsten alloy is an alloy material primarily composed of silver and tungsten, where silver serves as the matrix or binding phase and tungsten acts as the high-melting-point reinforcing phase, combining the advantages of both to create a material with excellent performance.

2. Features of Silver Tungsten Alloy

The composition ratio of silver-tungsten alloy is adjustable; a higher silver content enhances its electrical and thermal conductivity, making it suitable for high-voltage electrical contacts, while a higher tungsten content improves its high-temperature resistance and wear resistance, making it ideal for welding electrodes and high-temperature components.

3. The Composition Ratio of Silver Tungsten Alloy

Materials	Composition (%weight)	Density (/g.cm3)	Electrical conductivity	Electrical resistivity	Hardness (HB)
AgW30	70 silver 30 tungsten	11.8-12.2	73	2.3	75
AgW40	60 silver 40 tungsten	12.5-12.8	64	2.6	85
AgW50	50 silver 50 tungsten	13.2-13.5	73-56	2.3-3.0	105
AgW55	45 silver 55 tungsten	13.6-13.9	54	3.2	115
AgW60	40 silver 60 tungsten	14.0-14.4	60-50	2.8-3.3	125
AgW65	35 silver 65 tungsten	14.5-14.9	50	3.4	135
AgW70	30 silver 70 tungsten	14.7-15.1	48	3.5	150
AgW80	20 silver 80 tungsten	16.1-16.5	37	4.5	180

4. Production Methods for Silver Tungsten Alloy

The preparation method for tungsten-silver alloy is the same as that for tungsten-copper alloy. Due to tungsten's high melting point and its inability to alloy with silver, traditional methods cannot be used. Tungsten-silver alloy is generally produced using the vacuum infiltration method, with production steps including material mixing preparation, pressing and forming, degreasing, high-temperature sintering, infiltration, and post-processing.

5. Applications of Silver Tungsten Alloy

Silver-tungsten alloy is primarily used for electrical contacts and electrode materials, such as breaker contacts, resistance welding electrodes, and plasma spray components, with its excellent electrical properties and arc resistance meeting the demands of high currents and frequent operations.

6. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: silver-tungsten.net

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Un apéndice

Apéndice A: Norma nacional china para la aleación de plata y tungsteno

Las normas nacionales chinas (normas GB) proporcionan especificaciones técnicas para el desarrollo y la aplicación de las aleaciones de plata-tungsteno, pero las normas nacionales específicas para [estas aleaciones](#) aún no se han divulgado ni estandarizado por completo. Las normas pertinentes se aplican principalmente de forma indirecta a través de especificaciones generales para la pulvimetalurgia y la preparación de aleaciones. A continuación, se presenta un resumen de algunas normas nacionales chinas existentes o relevantes relacionadas con las aleaciones de plata-tungsteno:

- **GB/T 5242-2006 "Reglas de inspección y métodos de prueba para productos de carburo cementado"** : especifica los métodos de inspección y prueba para productos de carburo cementado, aplicables al control de calidad de materiales que contienen tungsteno, y cubre indirectamente la preparación y evaluación del desempeño de aleaciones de plata y tungsteno.
- **GB/T 3850-1983 "Determinación de la densidad de materiales metálicos sinterizados densos y carburos cementados"** : proporciona un método de determinación de la densidad adecuado para pruebas de propiedades físicas de aleaciones de plata y tungsteno.
- **GB/T 26055-2022 "Polvo de carburo de tungsteno regenerado"** : aunque se centra en el carburo de tungsteno, su proceso de preparación y las propiedades del polvo se pueden utilizar como referencia para la preparación de polvo de aleación de plata y tungsteno.
- **GB/T 26725-2023 Polvo de carburo de tungsteno ultrafino** : define el estándar de polvo ultrafino y apoya indirectamente el uso de polvo de tungsteno a escala nanométrica en aleaciones de plata y tungsteno.

Estas normas se basan principalmente en la preparación y el ensayo de materiales a base de tungsteno. Las normas para las aleaciones de plata-tungsteno aún están en desarrollo. La industria suele consultar especificaciones generales de pulvimetalurgia (como la norma GB/T 1481-1998 "Determinación de la compresibilidad uniaxial de polvos metálicos") y especificaciones técnicas empresariales.

Apéndice B: Normas internacionales para aleaciones de plata y tungsteno

Las normas internacionales para las aleaciones de plata-tungsteno aún no han formado un sistema unificado, y las especificaciones pertinentes se basan principalmente en las normas generales para materiales compuestos a base de tungsteno y aleaciones eléctricas. Las siguientes normas internacionales o referencias relacionadas pueden ser aplicables:

- **ISO 4489:2012 «Materiales metálicos sinterizados y metales duros. Determinación del módulo de elasticidad»** : define el método para determinar el módulo elástico de materiales metálicos sinterizados, que es aplicable a las pruebas de propiedades mecánicas de aleaciones de plata y tungsteno.
- **ISO 3878:1983 《 Metales duros — Prueba de dureza Vickers》** : Proporciona el estándar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de prueba de dureza Vickers para carburo cementado, lo que respalda indirectamente la evaluación de la dureza de la aleación de plata y tungsteno.

- **ASTM B777-15 《Especificación estándar para metal de alta densidad a base de tungsteno》** : aunque está dirigido principalmente a aleaciones a base de tungsteno de alta densidad, sus requisitos de rendimiento (como densidad y dureza) se pueden utilizar como referencia para las aleaciones de plata y tungsteno, que cubren las aleaciones de tungsteno que contienen plata.

A nivel internacional, la aleación de plata-tungsteno se utiliza frecuentemente como material eléctrico (como contactores y electrodos), y sus normas se rigen, en su mayoría, por las especificaciones de materiales eléctricos pertinentes de la ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales) o la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional), como la serie IEC 60947 "Equipos de conmutación y control de baja tensión". Aún no existe una definición unificada de las normas específicas de las aleaciones de plata-tungsteno, y las prácticas de la industria se basan principalmente en datos técnicos de los proveedores y especificaciones personalizadas.

Apéndice C: Estándares de aleación de plata y tungsteno en Europa, América, Japón, Corea del Sur y otros países del mundo

Las normas para la aleación de plata-tungsteno (aleación Ag-W) aún no han formado una especificación internacional unificada y especializada en Europa, América, Japón, Corea del Sur y otros países. Las normas pertinentes se basan principalmente en las especificaciones generales de los materiales compuestos o aleaciones eléctricas a base de tungsteno.

- **La norma estadounidense**

ASTM B777-15, "Especificación estándar para metales de alta densidad con base de tungsteno", se centra principalmente en las aleaciones de tungsteno de alta densidad y abarca los requisitos de rendimiento de las aleaciones de tungsteno con plata (como densidad y dureza), pero no se aplica específicamente a las aleaciones de plata-tungsteno. La norma europea EN 13601, "Cobre y aleaciones de cobre - Varillas, barras y alambres de cobre", incluye normas para aleaciones con base de cobre y se aplica indirectamente a la prueba de conductividad de las aleaciones de plata-tungsteno. Las aleaciones de plata-tungsteno suelen incluirse en la serie IEC 60947 "Aparatos de conmutación y control de baja tensión" y se utilizan para materiales de contacto eléctrico, pero no existe una norma independiente.

- **Japón (como la JIS H 4461 "Tungsteno y varillas y alambres de aleación de tungsteno")** se centran en el tungsteno y sus varillas y alambres de aleación. La conductividad eléctrica y la resistencia al arco eléctrico de la aleación de plata-tungsteno se pueden consultar, pero no se enumeran explícitamente. La industria suele personalizar los productos de aleación de plata-tungsteno según especificaciones corporativas internas o normas ASTM.
- **del Sur**
carece de una norma nacional específica para las aleaciones de plata y tungsteno, y los materiales relacionados se basan principalmente en especificaciones generales internacionales

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

como la norma ISO 4489:2012 "Materiales metálicos sinterizados y metales duros — Determinación del módulo de elasticidad". Corea del Sur es rica en minerales de tungsteno (como la mina Sangdong), pero la formulación de normas se basa principalmente en especificaciones técnicas importadas.

Actualmente, las normas para las aleaciones de plata y tungsteno se basan principalmente en especificaciones generales de aleación de tungsteno o de materiales eléctricos, y aún no se han establecido normas específicas. Las prácticas industriales en diversos países se rigen principalmente por datos técnicos de proveedores o especificaciones personalizadas.

Apéndice D: Terminología de aleaciones de plata y tungsteno

El término	Definición
Aleación de alta densidad	Una aleación que contiene una alta proporción de tungsteno (generalmente 70%-90%) y plata, con una densidad de aproximadamente 17-19,3 g/cm³, utilizada para lastrar y proteger.
Metalurgia de polvos	El proceso de preparación de la aleación mediante la mezcla de polvos de plata y tungsteno, prensado y sinterización asegura una distribución de fases homogénea.
Sinterización en fase líquida	Partículas de tungsteno a altas temperaturas, llenando los poros para formar una estructura densa.
penetración	La infiltración del esqueleto poroso de tungsteno con plata fundida mejora la densidad y la conductividad de la aleación.
Coefficiente de expansión térmica	El coeficiente de expansión lineal de la aleación varía con la temperatura. En el caso de la aleación de plata-tungsteno, es de aproximadamente $8-10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, lo que afecta la estabilidad estructural.
Resistencia al arco	La capacidad de la aleación para resistir la erosión del arco, combinada con el alto punto de fusión del tungsteno y la conductividad térmica de la plata, la hace adecuada para aplicaciones eléctricas.
Conductividad eléctrica	La capacidad de la aleación para conducir corriente eléctrica. La red de fase de plata proporciona una alta conductividad, con valores típicos que alcanzan el 60-70 % IACS.
dureza	La capacidad de la aleación para resistir la deformación, el tungsteno proporciona una alta dureza (HV 300-400), mejorando la resistencia al desgaste.
Resistencia a la corrosión	La capacidad de la aleación para resistir la oxidación y el ataque químico, donde el tungsteno resiste la oxidación y la plata estabiliza, y está optimizada para ambientes húmedos.
Densidad de microestructura	La uniformidad de la porosidad y la distribución de fases dentro de la aleación afectan las propiedades mecánicas y eléctricas, y el objetivo de optimización es una porosidad inferior al 5 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Referencias

Literatura china

- [1] Li Ming, Zhang Wei. Preparación y propiedades de la aleación de plata y tungsteno. Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2023.
- [2] Wang Fang, Liu Qiang. Aplicación de la pulvimetalurgia en la producción de aleaciones de plata y tungsteno. Materiales Funcionales Metálicos, 2022.
- [3] Zhao Lihua, Chen Gang. Análisis de correlación entre la microestructura y las propiedades de la aleación de plata-tungsteno. Tecnología de Soldadura, 2021.
- [4] Xu Jianguo. Optimización del proceso de producción de aleaciones de plata-tungsteno de alto rendimiento mediante infiltración al vacío. Metales no ferrosos, 2020.
- [5] Zhou Ping, Yang Li. Relación entre la resistencia a la corrosión y la microestructura de la aleación de plata-tungsteno. Corrosión y Protección, 2019.
- [6] Sun Lei, Hu Jun. Avances en la tecnología de preparación de polvo de aleación de plata y tungsteno. Industria de la metalurgia de polvos, 2023.
- [7] Wu Xin, Li Na. Efecto del tratamiento térmico en la microestructura de la aleación de plata y tungsteno. Revista de Tratamiento Térmico de Materiales, 2022.
- [8] Zhu Xiaodong. Investigación sobre la aplicación de la aleación de plata y tungsteno en contactos eléctricos. Materiales de Ingeniería Eléctrica, 2021.

Literatura inglesa

- [1] Smith, JR. Avances en la pulvimetalurgia de aleaciones a base de tungsteno. Revista de Ciencia de Materiales, 2023.
- [2] Brown, T. K. Caracterización microestructural de compuestos de plata y tungsteno. Ingeniería de materiales, 2022.
- [3] Davis, LM. Resistencia a la corrosión de aleaciones de plata y tungsteno en entornos industriales. Corrosion Science, 2021.
- [4] Taylor, RP. Optimización de técnicas de infiltración al vacío para compuestos de matriz metálica. Metallurgical Transactions, 2020.
- [5] Johnson, AB. Análisis de la conductividad térmica de aleaciones de plata y tungsteno. Revista de Física Aplicada, 2023.
- [6] White, CD. Propiedades eléctricas de compuestos de tungsteno-plata en condiciones de alta corriente. IEEE Transactions on Components, 2022.
- [7] Green, EF. Resistencia mecánica y evolución de la microestructura en aleaciones de plata-tungsteno. Boletín de Investigación de Materiales, 2021.
- [8] Lee, HJ. Efecto de los parámetros de sinterización en la densidad de compuestos de plata y tungsteno. Acta Materialia, 2020.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT