

## Was ist eine Silber-Wolfram-Legierung

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Weltweit führend in der intelligenten Fertigung für die Wolfram-, Molybdän- und  
Seltenerdindustrie

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## EINFÜHRUNG IN DIE CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, eine hundertprozentige Tochtergesellschaft mit unabhängiger Rechtspersönlichkeit, die von CHINATUNGSTEN ONLINE gegründet wurde, widmet sich der Förderung der intelligenten, integrierten und flexiblen Entwicklung und Herstellung von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets. CHINATUNGSTEN ONLINE, gegründet 1997 mit [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com) als Ausgangspunkt – Chinas erster erstklassiger Website für Wolframprodukte – ist das bahnbrechende E-Commerce-Unternehmen des Landes mit Fokus auf die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Industrien. CTIA GROUP nutzt fast drei Jahrzehnte umfassende Erfahrung in den Bereichen Wolfram und Molybdän, erbt die außergewöhnlichen Entwicklungs- und Fertigungskapazitäten, die erstklassigen Dienstleistungen und den weltweiten Ruf ihres Mutterunternehmens und wird so zu einem umfassenden Anbieter von Anwendungslösungen in den Bereichen Wolframchemikalien, Wolframmetalle, Hartmetalle, hochdichte Legierungen, Molybdän und Molybdänlegierungen.

In den vergangenen 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE über 200 mehrsprachige professionelle Websites zu den Themen Wolfram und Molybdän in mehr als 20 Sprachen erstellt, die über eine Million Seiten mit Nachrichten, Preisen und Marktanalysen zu Wolfram, Molybdän und Seltenen Erden enthalten. Seit 2013 wurden auf dem offiziellen WeChat-Konto „CHINATUNGSTEN ONLINE“ über 40.000 Informationen veröffentlicht, die fast 100.000 Follower erreichen und täglich Hunderttausenden von Branchenexperten weltweit kostenlose Informationen bieten. Mit Milliarden von Besuchen auf seinem Website-Cluster und seinem offiziellen Konto hat sich das Unternehmen zu einer anerkannten globalen und maßgeblichen Informationsdrehscheibe für die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Branche entwickelt, die rund um die Uhr mehrsprachige Nachrichten, Informationen zu Produktleistung, Marktpreisen und Markttrends bietet.

Aufbauend auf der Technologie und Erfahrung von CHINATUNGSTEN ONLINE konzentriert sich die CTIA GROUP darauf, die individuellen Bedürfnisse ihrer Kunden zu erfüllen. Mithilfe von KI-Technologie entwickelt und produziert sie gemeinsam mit ihren Kunden Wolfram- und Molybdänprodukte mit spezifischen chemischen Zusammensetzungen und physikalischen Eigenschaften (wie Partikelgröße, Dichte, Härte, Festigkeit, Abmessungen und Toleranzen). Das Angebot umfasst integrierte Dienstleistungen für den gesamten Prozess, vom Formenöffnen und der Probeproduktion bis hin zur Veredelung, Verpackung und Logistik. In den letzten 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE weltweit über 130.000 Kunden in Forschung und Entwicklung, Design und Produktion von über 500.000 Arten von Wolfram- und Molybdänprodukten unterstützt und so den Grundstein für eine maßgeschneiderte, flexible und intelligente Fertigung gelegt. Auf dieser Grundlage vertieft die CTIA GROUP die intelligente Fertigung und integrierte Innovation von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets weiter.

Dr. Hanns und sein Team bei der CTIA GROUP haben auf der Grundlage ihrer über 30-jährigen Branchenerfahrung auch Fachwissen, Technologien, Wolframpreise und Markttrendanalysen in Bezug auf Wolfram, Molybdän und Seltene Erden verfasst und veröffentlicht und geben diese kostenlos an die Wolframbranche weiter. Dr. Han, mit über 30 Jahren Erfahrung seit den 1990er Jahren im E-Commerce und internationalen Handel mit Wolfram- und Molybdänprodukten sowie in der Entwicklung und Herstellung von Hartmetallen und hochdichten Legierungen, ist im In- und Ausland ein renommierter Experte für Wolfram- und Molybdänprodukte. Getreu dem Grundsatz, der Branche professionelle und qualitativ hochwertige Informationen zu liefern, verfasst das Team der CTIA GROUP kontinuierlich technische Forschungsarbeiten, Artikel und Branchenberichte auf Grundlage der Produktionspraxis und der Kundenbedürfnisse und findet dafür breite Anerkennung in der Branche. Diese Erfolge stellen eine solide Unterstützung für die technologische Innovation, die Produktförderung und den Branchenaustausch der CTIA GROUP dar und verhelfen ihr zu einem führenden Unternehmen in der globalen Herstellung von Wolfram- und Molybdänprodukten sowie bei Informationsdienstleistungen.



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Inhaltsverzeichnis

### Kapitel 1: Grundkenntnisse der Silber-Wolfram-Legierung

- 1.1 Konzept der Silber-Wolfram-Legierung
  - 1.1.1 Definition der Silber-Wolfram-Legierung
  - 1.1.2 Unterschiede zur Wolfram-Kupfer-Legierung
  - 1.1.3 Unterschiede zur Wolfram-Molybdän-Legierung
- 1.2 Entwicklungsgeschichte der Silber-Wolfram-Legierung
  - 1.2.1 Frühe Explorationsphase
  - 1.2.2 Technologische Durchbrüche und Beginn industrieller Anwendungen
  - 1.2.3 Moderne technologische Innovation
- 1.3 Bedeutung und Stellenwert der Industrieforschung
  - 1.3.1 Förderung der Entwicklung der Materialwissenschaften
  - 1.3.2 Anwendungswert in verschiedenen Bereichen

### Kapitel 2: Zusammensetzung und Eigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung

- 2.1 Eigenschaften von Silber und Wolfram
  - 2.1.1 Physikalische und chemische Eigenschaften von Silber
  - 2.1.1 Physikalische und chemische Eigenschaften von Wolfram
  - 2.1.3 Silber-Wolfram-Zusammensetzung
- 2.2 Einfluss des Zusammensetzungsverhältnisses von Silber-Wolfram-Legierungen
  - 2.2.1 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Biegefestigkeit der Legierung
  - 2.2.2 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Zähigkeit der Legierung
  - 2.2.3 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Leitfähigkeit von Legierungen
  - 2.2.4 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Wärmeleitfähigkeit der Legierung
  - 2.2.5 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Legierungsdichte
  - 2.2.6 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Härte der Legierung
  - 2.2.7 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Hochtemperaturbeständigkeit der Legierung
  - 2.2.8 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Lichtbogenerosionsbeständigkeit von Legierungen
- 2.3 Leistungsanalyse der Silber-Wolfram-Legierung
  - 2.3.1 Entstehungsmechanismus und Vorteile der hohen Härte von Silber-Wolfram-Legierungen
    - 2.3.1.1 Mikrostruktureller Mechanismus der Bildung hoher Härte
    - 2.3.1.2 Vorteile hoher Härte bei verschleißfesten Anwendungen
    - 2.3.1.3 Härtevergleich mit anderen Legierungen und Vorteile
  - 2.3.2 Prinzip und Leistung der Lichtbogenerosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen
    - 2.3.2.1 Mechanismus der Lichtbogenerosion
    - 2.3.2.2 Das intrinsische Prinzip der Widerstandsfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen gegen Lichtbogenerosion
    - 2.3.2.3 Unterschiede in der Lichtbogenerosionsbeständigkeit in verschiedenen Einsatzumgebungen
    - 2.3.2.4 Möglichkeiten zur Verbesserung der Lichtbogenerosionsbeständigkeit
  - 2.3.3 Antihalt- und Antischweißigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2.3.3.1 Ursachen für Adhäsion und Verschweißung
- 2.3.3.2 Antihafte Wirkung der Silber-Wolfram-Legierung
- 2.3.3.3 Analyse der Faktoren, die die Antihafte- und Antischweißseigenschaften beeinflussen
- 2.3.4 Prinzip und Anwendung der hervorragenden Leitfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen
- 2.3.4.1 Physikalische Natur der Leitfähigkeit und Leitfähigkeitsmechanismus der Silber-Wolfram-Legierung
- 2.3.4.2 Leitfähigkeitsänderungen bei unterschiedlichen Komponentenverhältnissen
- 2.3.4.3 Vorteile leitfähiger Anwendungen in elektrischen Geräten
- 2.3.5 Eigenschaften und Wert der guten Wärmeleitfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen
- 2.3.5.1 Grundprinzipien der Wärmeleitfähigkeit und des Wärmeleitmechanismus einer Silber-Wolfram-Legierung
- 2.3.5.2 Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wärmeableitungseffekt
- 2.3.5.3 Anwendungswert der Wärmeleitfähigkeit in Arbeitsumgebungen mit hohen Temperaturen
- 2.3.6 Leistung und Mechanismus der Korrosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen
- 2.3.6.1 Auswirkungen unterschiedlicher Korrosionsumgebungen auf Silber-Wolfram-Legierungen
- 2.3.6.2 Intrinsischer Mechanismus der Korrosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen
- 2.3.6.3 Technologische Maßnahmen zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit
- 2.4 CTIA GROUP LTD Sicherheitsdatenblatt für Silber-Wolfram-Legierung

### **Kapitel 3: Beobachtung der Mikrostruktureigenschaften und Leistungskorrelation von Silber-Wolfram-Legierungen**

- 3.1 Beobachtung der Mikrostruktureigenschaften einer Silber-Wolfram-Legierung
- 3.1.1 Kornmorphologie und Größeneigenschaften
- 3.1.2 Phasenverteilung und Grenzflächeneigenschaften
- 3.1.3 Mikroskopische Erscheinungsformen von Porosität und Defekten
- 3.1.4 Mikrostrukturunterschiede bei unterschiedlichen Herstellungsverfahren
- 3.2 Intrinsische Beziehung zwischen der Struktur einer Silber-Wolfram-Legierung und den makroskopischen Eigenschaften
- 3.2.1 Mechanismus der Auswirkung der Kornstruktur auf Festigkeit und Zähigkeit
- 3.2.2 Zusammenhang zwischen Phasenverteilung und elektrischer und thermischer Leitfähigkeit
- 3.2.3 Einfluss von Porosität und Defekten auf Härte und Korrosionsbeständigkeit
- 3.3 Mikrostrukturentwicklung der Silber-Wolfram-Legierung
- 3.3.1 Mikrostrukturentwicklung durch Änderungen der Zusammensetzungsverhältnisse
- 3.3.2 Gefügeumwandlung während der Wärmebehandlung
- 3.3.3 Einfluss der Betriebsumgebung auf Mikrostruktur und Leistungsrückmeldung
- 3.4 Methoden zur Steuerung der Mikrostruktur von Silber-Wolfram-Legierungen
- 3.4.1 Methode zur Kontrolle der Mikrostruktur basierend auf dem Herstellungsprozess
- 3.4.2 Optimierung der Mikrostruktur durch Legierungselementzugabe
- 3.4.3 Zusammenhang zwischen Mikrostrukturregulierung und Leistungsanpassung

### **Kapitel 4: Herstellungsprozess der Silber-Wolfram-Legierung**

- 4.1 Pulvermetallurgisches Verfahren zur Herstellung einer Silber-Wolfram-Legierung

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

- 4.1.1 Pulveraufbereitungsprozess und wichtige Punkte
- 4.1.2 Prinzip und Funktionsweise des Pressvorgangs
- 4.1.3 Steuerung und Einfluss des Sinterprozesses
- 4.2 Herstellung einer Silber-Wolfram-Legierung mittels Vakuuminfiltration
- 4.2.1 Infiltrationsprinzip und apparative Anforderungen
- 4.2.2 Prozessschritte und Parameteroptimierung
- 4.2.3 Vorteile und Grenzen des Verfahrens
- 4.3 Verfahrenvergleich und Auswahlgrundlagen
- 4.3.1 Kostenanalyse verschiedener Verfahren
- 4.3.2 Leistungsunterschiede und Prozessauswahl
- 4.3.3 Produktionseffizienz und Prozessanpassung

## **Kapitel 5: Leistungstests und Charakterisierung von Silber-Wolfram-Legierungen**

- 5.1 Prüfung der physikalischen Eigenschaften einer Silber-Wolfram-Legierung
- 5.1.1 Dichteproofverfahren
- 5.1.2 Härteprüfnormen und -verfahren
- 5.1.3 Prüfverfahren für elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit
- 5.2 Bewertung der chemischen Eigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung
- 5.2.1 Prüfumgebung und -methoden für Korrosionsbeständigkeit
- 5.2.2 Methoden zur Prüfung der antioxidativen Leistung
- 5.3 Technologie zur Charakterisierung der Mikrostruktur von Silber-Wolfram-Legierungen
- 5.3.1 Metallografische Mikroskop-Beobachtungsmethode
- 5.3.2 Rasterelektronenmikroskopische Analyseanwendungen
- 5.3.3 Strukturanalyse mittels Röntgenbeugung

## **Kapitel 6: Anwendungsgebiete der Silber-Wolfram-Legierung**

- 6.1 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen im elektrischen Feld
- 6.1.1 Anwendungsvorteile in Niederspannungs-Leistungsschaltern
- 6.1.1.1 Leistungsanforderungen an Materialien von Niederspannungsschaltern
- 6.1.1.2 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in Niederspannungsschaltern
- 6.1.1.3 Vorteile der Verwendung von PCB-Materialien in Niederspannungsschaltern im Vergleich zu anderen Materialien
- 6.1.2 Nachfrage nach Elektrolegierungen für Hochspannungsschalter
- 6.1.2.1 Arbeitsumgebung von Hochspannungsschaltern und besondere Anforderungen an elektrische Legierungen
- 6.1.2.2 Leistung der Silber-Wolfram-Legierung bei der Erfüllung der Anforderungen an Hochspannungsschalter
- 6.1.3 Anwendung von Relais und offenen Leistungsschaltern
- 6.1.3.1 Funktionsprinzip des Relais und Anforderungen an Kontaktmaterialien
- 6.1.3.2 Anwendungseffekte von Silber-Wolfram-Legierungen in Relais
- 6.1.3.3 Leistungsanforderungen an Luftschalter und Kompatibilität von Silber-Wolfram-Legierungen
- 6.1.4 Anwendung in Trenn- und Erdungsschaltern

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

- 6.1.4.1 Funktion und Materialanforderungen an Trennschalter und Erdungsschalter
- 6.1.4.2 Vorteile der Silber-Wolfram-Legierung in Trennschaltern und Erdungsschaltern
- 6.2 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in der Elektronik
  - 6.2.1 Leistungsanforderungen und Anwendungen von EDM-Elektroden
    - 6.2.1.1 Leistungsindexanforderungen an Elektrodenmaterialien für den Elektrobearbeitungsprozess
    - 6.2.1.2 Leistungsvorteile der Silber-Wolfram-Legierung als Elektrode für die Elektrobearbeitung
    - 6.2.1.3 Auswahl von Elektroden aus Silber-Wolfram-Legierungen in verschiedenen Szenarien der elektrischen Bearbeitung
  - 6.2.2 Rolle der Materialien in der Mikroelektronik
    - 6.2.2.1 Präzisionsanforderungen an Materialien in der Mikroelektronik
    - 6.2.2.2 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in mikroelektronischen Gehäusen
    - 6.2.2.3 Die Rolle der Silber-Wolfram-Legierung in mikroelektronischen Verbindungskomponenten
  - 6.2.3 Anwendungsforschung in der Sensorik
    - 6.2.3.1 Anforderungen an die Arbeitsumgebung des Sensors und die Materialeistung
    - 6.2.3.2 Mögliche Anwendungsszenarien der Silber-Wolfram-Legierung in Sensoren
- 6.3 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in der Luft- und Raumfahrt
  - 6.3.1 Anwendung der Düsenhalsauskleidung für Feststoffraketen
    - 6.3.1.1 Arbeitsumgebung und Materialherausforderungen bei der Auskleidung von Feststoffraketen Düsen
    - 6.3.1.2 Leistung der Silber-Wolfram-Legierung als Düsenhalsauskleidung
    - 6.3.1.3 Herstellung und Anwendungseffekt der Düsenhalsauskleidung aus Silber-Wolfram-Legierung
  - 6.3.2 Potenzielle Anwendungen von Triebwerkskomponenten für die Luft- und Raumfahrt
    - 6.3.2.1 Anforderungen an Werkstoffe im Hochtemperatur- und Hochdruck-Arbeitsumfeld von Flugzeugtriebwerken
    - 6.3.2.2 Anwendungspotenzial der Silber-Wolfram-Legierung in spezifischen Teilen von Flugzeugtriebwerken
  - 6.3.3 Anwendung in elektrischen Raumfahrzeugsystemen
    - 6.3.3.1 Zuverlässigkeitsanforderungen an elektrische Systeme von Raumfahrzeugen
    - 6.3.3.2 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in Raumfahrzeug-Schützen und anderen Komponenten
- 6.4 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in anderen Bereichen
  - 6.4.1 Anwendungsszenarien in der metallurgischen Industrie
    - 6.4.1.1 Arbeitsbedingungen und Materialanforderungen metallurgischer Anlagen
    - 6.4.1.2 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in metallurgischen Ofenelektroden
    - 6.4.1.3 Verwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in metallurgischen Prüfgeräten
  - 6.4.2 Anwendungsfälle im Sportgerätebereich
    - 6.4.2.1 Anforderungen an die Materialeigenschaften von High-End-Sportgeräten
    - 6.4.2.2 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in Golfschlägern, Angelgeräten und anderen Ausrüstungsgegenständen
  - 6.4.3 Exploration und Anwendung im Bereich der Medizinprodukte
    - 6.4.3.1 Anforderungen an die Materialbiokompatibilität und Leistung von Medizinprodukten
    - 6.4.3.2 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in medizinischen Bildgebungsgeräten

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



6.4.3.3 Mögliche Anwendungen von Silber-Wolfram-Legierungen in Präzisionschirurgieinstrumenten

6.4.4 Anwendungsperspektiven im Bereich der Kernenergie

6.4.4.1 Anforderungen an die Strahlungsbeständigkeit und andere Eigenschaften von Werkstoffen in Kernenergieanlagen

6.4.4.2 Analyse der Anwendungsmöglichkeiten von Silber-Wolfram-Legierungen im Bereich der Kernenergie

## Kapitel 7: Zukünftige Entwicklungsrichtung der Silber-Wolfram-Legierung

7.1 Erforschung neuer Herstellungstechnologien für Silber-Wolfram-Legierungen

7.1.1 Potenzielle Anwendungen der additiven Fertigungstechnologie

7.1.2 Ausblick auf andere hochmoderne Präparationstechnologien

7.2 Forschungstrends zur Leistungsoptimierung von Silber-Wolfram-Legierungen

7.2.1 Forschungsrichtungen zur Verbesserung der Gesamtleistung

7.2.2 Leistungsverbesserungen für bestimmte Anwendungen

## Anhang

Anhang A: Chinesischer Nationalstandard für Silber-Wolfram-Legierungen

Anhang B: Internationale Normen für Silber-Wolfram-Legierungen

Anhang C: Standards für Silber-Wolfram-Legierungen in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern weltweit

Anhang D: Terminologie der Silber-Wolfram-Legierung

## Verweise



CTIA GROUP LTD Silber-Wolfram-Legierung

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## CTIA GROUP LTD

### 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<br>(%weight) | Density<br>(/g.cm3) | Electrical<br>conductivity | Electrical<br>resistivity | Hardness<br>(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](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [silver-tungsten.net](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

## Kapitel 1 Grundkenntnisse der Silber-Wolfram-Legierung

Als Hochleistungsverbundwerkstoff bietet die Silber-Wolfram-Legierung aufgrund ihrer hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, hohen Temperaturbeständigkeit und Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit ein breites Anwendungspotenzial in den Bereichen Elektrotechnik, Elektronik, Verteidigung und Industrie. Die pulvermetallurgisch hergestellte Legierung vereint die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit von Silber mit dem hohen Schmelzpunkt und der Härte von Wolfram und erfüllt die hohen Anforderungen in Umgebungen mit hohen Strömen, hohen Temperaturen und hohem Verschleiß. Mit der rasanten Entwicklung der Elektrifizierung und der Entwicklung von Hochleistungsgeräten gewinnt die Silber-Wolfram-Legierung in den Bereichen elektrische Kontakte, Leistungsschalter und Elektrodenmaterialien zunehmend an Bedeutung.

### 1.1 Konzept der Silber-Wolfram-Legierung

Silber-Wolfram-Legierung ist ein Verbundwerkstoff mit Silber und Wolfram als Hauptbestandteilen. Sie wird üblicherweise pulvermetallurgisch hergestellt und findet breite Anwendung in Bereichen, die hohe Leitfähigkeit, Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit und hohe Temperaturbeständigkeit erfordern. Silber bietet eine ausgezeichnete elektrische und thermische Leitfähigkeit, während Wolfram einen hohen Schmelzpunkt, Härte und Verschleißfestigkeit verleiht. Dadurch eignet sich die Legierung gut für elektrischen Kontakt und hohe Temperaturen. Die Leistung der Silber-Wolfram-Legierung kann durch Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses optimiert werden, um den Anforderungen verschiedener Anwendungen gerecht zu werden, beispielsweise in Hochspannungsschaltern, Schweißelektroden und elektrischen Komponenten für die Luft- und Raumfahrt.

#### 1.1.1 Definition der Silber-Wolfram-Legierung

Silber-Wolfram-Legierung ist ein pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoff aus Silber und Wolfram. Silber dient als Matrix oder Bindephase, Wolfram als hochschmelzende Verstärkungsphase. Die Vorteile beider Legierungen vereinen sich zu einem Werkstoff mit hervorragender Leistung. Die hohe elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Silber machen es zu einer idealen leitfähigen Matrix, während der hohe Schmelzpunkt und die Härte von Wolfram der Legierung eine hervorragende Temperaturbeständigkeit und Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit verleihen. Der Herstellungsprozess umfasst üblicherweise Pulvermischen, Pressen, Sintern und Nachbearbeitung. Silber bildet während des Sinterprozesses eine flüssige Phase, benetzt die Wolframpartikel, füllt die Zwischenräume und bildet eine dichte Mikrostruktur. Das Zusammensetzungsverhältnis der Silber-Wolfram-Legierung ist einstellbar. Ein höherer Silbergehalt verbessert die Leitfähigkeit, ein höherer Wolframgehalt die Verschleißfestigkeit und Temperaturbeständigkeit. Die Legierung eignet sich beispielsweise für elektrische Kontakte, Leistungsschalterkontakte, Widerstandsschweißelektroden und plasmagespritzte Teile. Seine Nichtmagnetizität und sein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient verbessern seine Anwendbarkeit in hochpräzisen elektrischen Umgebungen und Hochtemperaturumgebungen zusätzlich.

Der Hauptvorteil der Silber-Wolfram-Legierung liegt in ihrer umfassenden Leistung. Die hohe

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Leitfähigkeit von Silber gewährleistet eine effiziente Stromübertragung und eignet sich für Hochspannungsnetze. Der hohe Schmelzpunkt und die Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit von Wolfram sorgen dafür, dass die Legierung auch bei hohen Strömen oder häufigen Schaltvorgängen stabil bleibt und ihre Lebensdauer verlängert. Dank ihrer Zähigkeit und Verschleißfestigkeit hält die Legierung mechanischen Stößen und Lichtbogenerosion stand und eignet sich daher für dynamische elektrische Umgebungen. Dank des flexiblen Herstellungsprozesses kann die Leistung durch Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses oder Zugabe von Spurenelementen (wie Nickel) optimiert werden, um spezifischen Anwendungsanforderungen gerecht zu werden. Silber-Wolfram-Legierungen werden in der Elektrotechnik und Industrie häufig zur Herstellung hochzuverlässiger Kontakte und Elektroden eingesetzt, insbesondere in Anwendungen, die eine hohe Leitfähigkeit und Lichtbogenbeständigkeit erfordern, wie z. B. in Energiesystemen, elektrischen Verbindungen in der Luft- und Raumfahrt und beim industriellen Schweißen.

### 1.1.2 Unterschiede zur Wolfram-Kupfer-Legierung

Silber-Wolfram-Legierungen (Ag-W) und Wolfram-Kupfer-Legierungen (W-Cu) sind beides pulvermetallurgisch hergestellte Verbundwerkstoffe auf Wolframbasis, die in der Elektro- und Wärmetechnik weit verbreitet sind. Allerdings unterscheiden sich die beiden Werkstoffe hinsichtlich Zusammensetzung, Leistung und Anwendungsszenarien erheblich.

**Zusammensetzung und Herstellung :** Silber-Wolfram-Legierungen verwenden Silber als Matrix oder Bindephase und Wolfram als Verstärkungsphase. Der Silbergehalt ist üblicherweise hoch, was der Legierung eine ausgezeichnete elektrische Leitfähigkeit verleiht. Wolfram-Kupfer-Legierungen verwenden Wolfram als Matrix und Kupfer als Bindephase. Der Kupfergehalt ist relativ niedrig und dient hauptsächlich der Wärmeleitfähigkeit und der Verarbeitungsleistung. Beim Sinterprozess von Silber-Wolfram-Legierungen wird die flüssige Silberphase verwendet, um die Wolframpartikel zu benetzen und so eine gleichmäßige und dichte Struktur zu bilden. Wolfram-Kupfer-Legierungen werden hingegen häufig durch Infiltration hergestellt, wobei zuerst das Wolframskelett gesintert und dann flüssiges Kupfer infiltriert wird. Dieser Prozess ist komplizierter und energieintensiver. Der Silbergehalt macht Silber-Wolfram-Legierungen teurer, während Wolfram-Kupfer-Legierungen aufgrund des niedrigeren Kupferpreises wirtschaftlicher sind.

**Leistungsunterschiede :** Die elektrische Leitfähigkeit einer Silber-Wolfram-Legierung ist besser als die einer Wolfram-Kupfer-Legierung, da die elektrische Leitfähigkeit von Silber höher ist als die von Kupfer. Daher eignet sie sich für elektrische Kontaktanwendungen mit hohen Strömen, wie Leistungsschalter und Schalterkontakte. Die Wärmeleitfähigkeit einer Wolfram-Kupfer-Legierung ist stärker, da die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer etwas höher ist als die von Silber. Daher eignet sie sich für Wärmemanagementanwendungen, wie z. B. elektronische Wärmeableitungssubstrate und Elektrodenmaterialien. Die Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit einer Silber-Wolfram-Legierung ist besser als die einer Wolfram-Kupfer-Legierung, da der hohe Schmelzpunkt und die chemische Stabilität von Silber sie widerstandsfähiger gegen Ablation in einer Lichtbogenumgebung machen. Daher eignet sie sich für elektrische Systeme mit häufigem Schalten. Die Dichte einer Wolfram-Kupfer-Legierung ist

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

etwas niedriger als die einer Silber-Wolfram-Legierung, da die Dichte von Kupfer geringer ist als die von Silber. Dies beschränkt ihre Anwendung in Anwendungen, die einen hohen Gewichtsausgleich erfordern. Die Zähigkeit einer Silber-Wolfram-Legierung ist der einer Wolfram-Kupfer-Legierung etwas unterlegen, da die Duktilität von Silber geringer ist als die von Kupfer, aber seine Härte und Verschleißfestigkeit sind höher und es ist für Szenarien mit hohem Verschleiß geeignet.

**Anwendungsszenarien** : Silber-Wolfram-Legierungen werden hauptsächlich für elektrische Kontakte und Elektrodenmaterialien verwendet, beispielsweise für Hochspannungsschalterkontakte, Widerstandsschweißelektroden und plasmagespritzte Teile. Ihre hervorragende Leitfähigkeit und Lichtbogenbeständigkeit erfüllen die Anforderungen bei hohen Strömen und häufigem Betrieb. Wolfram-Kupfer-Legierungen werden häufiger in Wärmemanagementkomponenten wie Leistungshalbleitersubstraten, Serverkühlkörpern und Raketendüsenauskleidungen eingesetzt. Ihre hohe Wärmeleitfähigkeit und Verarbeitungsleistung eignen sich besser für die Wärmeableitung und Hochtemperaturumgebungen. Die nichtmagnetische Natur der Silber-Wolfram-Legierung bietet Vorteile in elektromagnetisch sensiblen Umgebungen (wie z. B. MRT-Geräten). Die nichtmagnetische Natur der Wolfram-Kupfer-Legierung ist ebenfalls anwendbar, ihre geringere Dichte schränkt jedoch den Einsatz in Abschirm- oder Gegengewichtsanwendungen ein. Die hohen Kosten der Silber-Wolfram-Legierung schränken ihre Anwendung in kostensensitiven Szenarien ein, während Wolfram-Kupfer-Legierungen wirtschaftlicher und für die Massenproduktion geeignet sind.

**Zusammenfassung der Vor- und Nachteile:** Silber-Wolfram-Legierungen haben eine bessere elektrische Leitfähigkeit und Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit als Wolfram-Kupfer-Legierungen und eignen sich für hochzuverlässige elektrische Kontakte. Sie sind jedoch teurer und haben eine etwas geringere Wärmeleitfähigkeit. Wolfram-Kupfer-Legierungen bieten bessere Wärmeleitfähigkeit und bessere Verarbeitungseigenschaften und eignen sich für Wärmemanagementkomponenten, weisen jedoch eine geringere Lichtbogenbeständigkeit und Dichte auf. Die Materialauswahl muss entsprechend den Anwendungsanforderungen abgewogen werden. Beispielsweise werden Silber-Wolfram-Legierungen für elektrische Kontakte bevorzugt, während Wolfram-Kupfer-Legierungen für Wärmeableitungssubstrate bevorzugt werden. Optimierungsvorschläge umfassen die Verbesserung der Zähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen durch Zugabe von Spurenelementen (wie Nickel) oder die Nutzung der additiven Fertigung zur Reduzierung der Herstellungskosten von Wolfram-Kupfer-Legierungen.

### 1.1.3 Unterschiede zur Wolfram-Molybdän-Legierung

Silber-Wolfram-Legierungen (Ag-W) und Wolfram-Molybdän-Legierungen (W-Mo) sind beides Verbundwerkstoffe auf Wolframbasis, die häufig im Hochtemperatur- und Elektrobereich eingesetzt werden. Zwischen den beiden bestehen jedoch erhebliche Unterschiede hinsichtlich Zusammensetzung, Leistung und Anwendungsszenarien.

**Zusammensetzung und Herstellung** : Silber-Wolfram-Legierungen verwenden Silber als Matrix bzw. Bindephase und Wolfram als Verstärkungsphase. Sie werden durch pulvermetallurgische Verfahren (wie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pulvermischen, Pressen und Flüssigphasensintern) hergestellt. Silber bildet bei hohen Temperaturen eine flüssige Phase, benetzt die Wolframpartikel und bildet eine dichte Struktur. Wolfram-Molybdän-Legierungen bestehen hauptsächlich aus Wolfram und Molybdän. Sie werden üblicherweise durch Pulvermetallurgie oder Vakuumschmelzen hergestellt. Molybdän, ein Metall mit hohem Schmelzpunkt und ähnlichen Eigenschaften wie Wolfram, verbessert die Hochtemperaturbeständigkeit der Legierung. Der Silbergehalt verleiht Silber-Wolfram-Legierungen eine ausgezeichnete Leitfähigkeit. Wolfram-Molybdän-Legierungen enthalten hingegen keine Edelmetalle und sind günstiger, besitzen aber keine leitfähige Matrix. Der Herstellungsprozess von Wolfram-Molybdän-Legierungen erfordert eine höhere Sintertemperatur, da der Schmelzpunkt von Molybdän etwas niedriger ist als der von Wolfram, und die Prozesssteuerung ist komplexer.

**Leistungsunterschiede** : Die elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen sind wesentlich besser als die von Wolfram-Molybdän-Legierungen, da die Zugabe von Silber die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit deutlich verbessert und sie für elektrische Kontakte und Elektrodenanwendungen geeignet sind. Die elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Wolfram-Molybdän-Legierungen sind schlecht, was hauptsächlich auf die inhärenten Eigenschaften von Wolfram und Molybdän zurückzuführen ist, und sie eignen sich eher für Strukturkomponenten als für elektrische Anwendungen. Silber-Wolfram-Legierungen weisen eine ausgezeichnete Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit auf, da die chemische Stabilität von Silber sie resistent gegen Ablation unter Hochstromlichtbögen macht, während Wolfram-Molybdän-Legierungen in Lichtbogenumgebungen leicht oxidieren und eine schwache Korrosionsbeständigkeit aufweisen. Wolfram-Molybdän-Legierungen weisen eine etwas bessere Festigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit auf, da Molybdän die mechanischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen verbessert und sie für Umgebungen mit extrem hohen Temperaturen (wie z. B. Düsen in der Luft- und Raumfahrt) geeignet sind. Die Dichte einer Silber-Wolfram-Legierung ist höher als die einer Wolfram-Molybdän-Legierung und eignet sich für Anwendungen, die einen hohen Gewichtsausgleich erfordern, während eine Wolfram-Molybdän-Legierung eine geringere Dichte aufweist.

**Anwendungsszenarien** : Silber-Wolfram-Legierungen werden hauptsächlich für elektrische Kontakte, Leistungsschalterkontakte und Widerstandsschweißelektroden verwendet. Ihre hohe Leitfähigkeit und Lichtbogenfestigkeit erfüllen die Anforderungen von Hochspannungssystemen wie Leistungsschaltern und elektrischen Anschlüssen in der Luft- und Raumfahrt. Wolfram-Molybdän-Legierungen werden aufgrund ihrer hervorragenden Temperaturbeständigkeit und Festigkeit häufiger in Hochtemperatur-Strukturkomponenten wie Raketentriebwerksdüsen, Ofeneinbauten und Hochtemperaturformen verwendet. Silber-Wolfram-Legierungen bieten Vorteile in der Medizin und Elektronik, während Wolfram-Molybdän-Legierungen besser für Szenarien mit extrem hohen Temperaturen und mechanischer Belastung geeignet sind. Die Kosten von Silber-Wolfram-Legierungen sind aufgrund der Silberzugabe höher, was ihre Verwendung in groß angelegten Strukturanwendungen einschränkt, während Wolfram-Molybdän-Legierungen aufgrund ihrer geringeren Kosten wirtschaftlicher sind.

**Zusammenfassung der Vor- und Nachteile** : Silber-Wolfram-Legierungen sind Wolfram-Molybdän-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Legierungen hinsichtlich elektrischer Leitfähigkeit, Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit und hochdichter Gegengewichte überlegen und eignen sich für hochzuverlässige elektrische Anwendungen, sind jedoch teuer und in Bezug auf die Beständigkeit gegen extrem hohe Temperaturen etwas schlechter. Wolfram-Molybdän-Legierungen haben Vorteile hinsichtlich Hochtemperaturfestigkeit und Kosteneffizienz und eignen sich für Hochtemperatur-Strukturkomponenten, ihre elektrische Leitfähigkeit und Lichtbogenbeständigkeit sind jedoch unzureichend. Die Materialauswahl muss entsprechend den Anwendungsanforderungen abgewogen werden. Beispielsweise werden Silber-Wolfram-Legierungen für elektrische Kontakte und Wolfram-Molybdän-Legierungen für Hochtemperatur-Strukturkomponenten bevorzugt. Optimierungsvorschläge umfassen die Verbesserung der Hochtemperaturbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen durch Zugabe von Spurenelementen oder den Einsatz fortschrittlicher Sintertechnologien zur Erhöhung der Dichte von Wolfram-Molybdän-Legierungen.

## 1.2 Entwicklungsgeschichte der Silber-Wolfram-Legierung

Die Entwicklung der Silber-Wolfram-Legierung spiegelt die koordinierte Entwicklung von Materialwissenschaft und industriellen Anforderungen wider. Von der frühen Erforschung bis hin zu Durchbrüchen in modernen Hochleistungsanwendungen hat sie mehrere Phasen der Materialaufbereitung, Leistungsoptimierung und Anwendungserweiterung durchlaufen. Die Forschung und Entwicklung der Silber-Wolfram-Legierung begann mit der Nachfrage nach hochleitfähigen und lichtbogenbeständigen Materialien und entwickelte sich allmählich zu einem Schlüsselmaterial in den Bereichen Elektrotechnik, Elektronik und Verteidigung.

### 1.2.1 Frühe Explorationsphase

Die Erforschung von Silber-Wolfram-Legierungen begann im frühen 20. Jahrhundert, als der Aufstieg der Elektroindustrie einen dringenden Bedarf an Hochleistungskontaktmaterialien schuf. Frühe elektrische Geräte (wie Schalter und Relais) verwendeten oft reines Silber oder Kupfer als Kontaktmaterialien. Diese Materialien neigen jedoch bei hohen Strömen oder häufigen Schaltvorgängen zu Lichtbogenerosion und Adhäsion, haben eine kurze Lebensdauer und sind wenig zuverlässig. Wolfram soll aufgrund seines hohen Schmelzpunkts und seiner Härte die Lichtbogenbeständigkeit von Kontakten erhöhen, doch reines Wolfram weist eine schlechte Leitfähigkeit auf und ist schwer zu verarbeiten. Forscher begannen, Silber mit Wolfram zu kombinieren und nutzten dabei die Leitfähigkeit von Silber und die hohe Temperaturbeständigkeit von Wolfram, um Verbundwerkstoffe zu entwickeln, die beides vereinen.

Die anfängliche Herstellung erfolgte hauptsächlich durch einfache Pulvermischung sowie Press- und Sinterprozesse. Das Silber-Wolfram-Verhältnis ließ sich nur schwer genau steuern, die Mikrostruktur der Legierung war ungleichmäßig und die Leistungsstabilität unzureichend. Frühe Experimente konzentrierten sich auf Legierungen mit niedrigem Silbergehalt, um Kosten und Leistung ins Gleichgewicht zu bringen, aber die Leitfähigkeit war schlecht, was den Anwendungsbereich begrenzte. Herausforderungen in der Explorationsphase umfassten ungleichmäßige Pulvermischung, hohe

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Sinterporosität und Rückwärtsverarbeitungstechnologie, wodurch die Leistung der Legierung nicht den industriellen Anforderungen genügen konnte. Trotzdem hat sich das Potenzial der Silber-Wolfram-Legierung nach und nach in der Anwendung für elektrische Kontakte und Elektroden offenbart und den Grundstein für nachfolgende technologische Durchbrüche gelegt. Die frühe Forschung konzentrierte sich hauptsächlich auf Labore und Experimente im kleinen Maßstab, die auf einfache elektrische Schalter und Industrielektroden angewendet wurden, und markierte den Übergang der Silber-Wolfram-Legierung vom Konzept zur ersten Anwendung.

### 1.2.2 Technologische Durchbrüche und Beginn industrieller Anwendungen

Mitte des 20. Jahrhunderts, mit der rasanten Entwicklung der Pulvermetallurgie und der Elektroindustrie, läutete die Silber-Wolfram-Legierung die Anfangsphase technologischer Durchbrüche und industrieller Anwendungen ein. Fortschrittliche Pulvermetallurgieverfahren wie Flüssigphasensintern und Heißpressen haben die Dichte und Leistungskonsistenz der Legierung deutlich verbessert. Das Flüssigphasensintern benetzt Wolframpartikel, fllt Mikroporen und bildet durch den flüssigen Silberfluss bei hohen Temperaturen eine gleichmäßige Mikrostruktur. Dies verbessert die Leitfähigkeit und Lichtbogenfestigkeit deutlich. Forscher optimierten das Silber-Wolfram-Verhältnis und fanden heraus, dass Legierungen mit hohem Silbergehalt eine bessere Leitfähigkeit aufweisen und sich für Hochspannungskontakte eignen, während Legierungen mit hohem Wolframgehalt verschleißfester und hochtemperaturbeständiger sind und sich daher als Elektrodenmaterial eignen.

Fortschritte in der Herstellungstechnologie haben die industrielle Produktion von Silber-Wolfram-Legierungen gefördert. Die Einführung von Vakuumsintern und Inertgasschutztechnologie reduzierte Oxidationsprobleme, verbesserte die Reinheit und Nichtmagnetizität der Legierung und erfüllte die Anforderungen von Anwendungen mit hohen Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit. Der Einsatz von Przisionsbearbeitungstechnologien (wie EDM und CNC-Fräsen) ermöglicht die Herstellung komplex geformter Kontakte und Elektroden und erweitert so den Anwendungsbereich der Legierungen in Hochspannungsschaltern, Widerstandsschweigerten und elektrischen Systemen in der Luft- und Raumfahrt. Der Beginn industrieller Anwendungen profitierte zudem von der rasanten Entwicklung der Energiesysteme und der Fertigungsindustrie. Der dringende Bedarf an lichtbogenfesten und hochleitfähigen Materialien in Hochspannungsschaltanlagen und automatisierten Schweigerten hat die Markteinführung von Silber-Wolfram-Legierungen gefördert. In dieser Phase fand die Silber-Wolfram-Legierung breite Anwendung in Hochspannungs-Leistungsschalterkontakten, Relaiskontakten und Widerstandsschweielektroden. Ihre ausgezeichnete Lichtbogenkorrosionsbestndigkeit und elektrische Leitfähigkeit verlängerten die Lebensdauer der Geräte deutlich und verbesserten die Betriebszuverlässigkeit. Auch in der Luft- und Raumfahrt wurde die Silber-Wolfram-Legierung zunehmend zur Herstellung elektrischer Verbindungskomponenten verwendet, wobei ihre nichtmagnetischen und hochdichten Eigenschaften zur Optimierung der Systemleistung genutzt wurden. Zu den technologischen Durchbrüchen gehört auch die Verbesserung der Zähigkeit und der Verarbeitungseigenschaften der Legierung durch die Zugabe von Spurenelementen (wie Nickel oder Kobalt), wodurch der Anwendungsbereich weiter erweitert wurde. Der Beginn der industriellen Anwendung markiert den Übergang der Silber-Wolfram-Legierung vom Labor zur Großproduktion und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



legt den Grundstein für ihre breite Anwendung in der modernen Elektro- und Hochtemperaturbranche. Zu den Optimierungsrichtungen gehören die Entwicklung effizienterer Sintertechnologien und kostengünstiger Herstellungsverfahren, um den hohen Silberpreisen gerecht zu werden.

### 1.2.3 Moderne technologische Innovation

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts haben Forschung, Entwicklung und Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen eine Welle moderner technologischer Innovationen ausgelöst, die vom Fortschritt in Materialwissenschaft, Fertigungstechnologie und Anwendungsanforderungen profitiert. Moderne technologische Innovationen konzentrieren sich hauptsächlich auf drei Aspekte: Optimierung des Herstellungsprozesses, Leistungssteigerung und Erweiterung der Anwendungsszenarien. Fortschrittliche Pulvermetallurgie-Technologien wie das Spark-Plasma-Sintern (SPS) verkürzen die Sinterzeit deutlich, reduzieren das Kornwachstum und verbessern die Dichte und Leistungskonsistenz der Legierung durch schnelles Erhitzen mit gepulstem Strom und hohem Druck. Diese Technologie macht die Mikrostruktur der Silber-Wolfram-Legierung gleichmäßiger, verbessert die Leitfähigkeit und Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit und eignet sich für hochpräzise elektrische Kontakte und Elektrodenanwendungen. Die Entwicklung der Nanotechnologie hat die Anwendung von nanoskaligem Silber-Wolfram-Pulver gefördert. Die hohe spezifische Oberfläche der Nanopartikel verbessert den Flüssigphasensintereffekt, steigert die Festigkeit, Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Legierung und eignet sich für miniaturisierte elektrische Bauteile und Hochtemperaturolektroden.

Die additive Fertigungstechnologie (3D-Druck) hat die Herstellung von Silber-Wolfram-Legierungen revolutioniert. Durch selektives Laserschmelzen (SLM) oder Elektronenstrahlschmelzen können Kontakte oder Elektroden mit komplexen Geometrien direkt hergestellt werden. Dies reduziert den Materialabfall gegenüber herkömmlichen Verfahren und ermöglicht gleichzeitig ein individuelles Design, das den Anforderungen der Luft- und Raumfahrt sowie der Medizintechnik gerecht wird. Oberflächenmodifizierungstechnologien wie Nanobeschichtungen (z. B. TiN oder DLC), die mittels plasmaunterstützter chemischer Gasphasenabscheidung (PECVD) aufgebracht werden, verbessern die Verschleißfestigkeit und Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit der Legierung deutlich und verlängern so die Lebensdauer von Hochspannungsschalterkontakten und Schweißelektroden. Der Einsatz umweltfreundlicher Fertigungstechnologien, wie der Einsatz umweltfreundlicher Bindemittel und energiesparender Sinterverfahren, reduziert Energieverbrauch und Emissionen im Produktionsprozess und fördert die nachhaltige Entwicklung von Silber-Wolfram-Legierungen.

Moderne technologische Innovationen umfassen auch intelligentes und funktionales Design. Intelligente Überwachungstechnologie erkennt Lichtbogenverschleiß und Temperaturänderungen von Kontakten aus Silber-Wolfram-Legierungen in Echtzeit durch eingebettete Sensoren, optimiert Wartungszyklen und verbessert die Gerätezuverlässigkeit. Die Entwicklung funktionaler Gradientenmaterialien (FGM) ermöglicht Silber-Wolfram-Legierungen, in verschiedenen Bereichen graduelle Eigenschaften zu erzielen, beispielsweise einen hohen Silberanteil an der Oberfläche zur Verbesserung der Leitfähigkeit und einen hohen Wolframanteil im Inneren zur Verbesserung der Temperaturbeständigkeit. Dies eignet sich für multifunktionale elektrische Komponenten. Diese technologischen Innovationen haben die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistungsfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen deutlich verbessert und ihre Anwendungsmöglichkeiten in den Bereichen Neue Energien (z. B. Ladestationenkontakte für Elektrofahrzeuge), 5G-Kommunikation (Hochfrequenzmodule) und Landesverteidigung (Radarelektroden) erweitert. Zu den Optimierungsschwerpunkten gehören die Entwicklung effizienterer Nanopulver-Herstellungstechnologien, die Erforschung selbstheilender Beschichtungen zur Bekämpfung von Lichtbogenverschleiß und die Integration künstlicher Intelligenz zur Optimierung der Herstellungsparameter. Zukünftig werden Silber-Wolfram-Legierungen voraussichtlich größere Durchbrüche in intelligenten elektrischen Systemen und extremen Umgebungen erzielen.

### 1.3 Bedeutung und Stellenwert der Industrieforschung

Die industrielle Forschung zu Silber-Wolfram-Legierungen trägt maßgeblich zur Entwicklung der Materialwissenschaften und ihrer Anwendung in verschiedenen Bereichen bei. Durch eingehende Forschung zu Herstellungsprozess, Leistungsoptimierung und Ausfallmechanismen können nicht nur die Leistung und Zuverlässigkeit der Legierung verbessert, sondern auch Innovation und Fortschritt in verwandten Branchen gefördert werden. Durch interdisziplinäre Zusammenarbeit vereint die industrielle Forschung Materialwissenschaften, Elektrotechnik und Fertigungstechnologie, um theoretische Unterstützung und technische Garantien für die Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in den Bereichen Hochleistungselektrik, Elektronik und Verteidigung zu bieten.

#### 1.3.1 Förderung der Entwicklung der Materialwissenschaften

Die Forschung an Silber-Wolfram-Legierungen hat die Entwicklung der Materialwissenschaften maßgeblich beeinflusst. Als typischer Vertreter von Verbundwerkstoffen hat die Weiterentwicklung ihrer Herstellungsverfahren (wie Pulvermetallurgie, Nanotechnologie und additive Fertigung) die Entwicklung von Hochleistungsverbundwerkstoffen vorangetrieben. Durch die Optimierung des Silber-Wolfram-Verhältnisses, die Einführung von Nanostrukturen und funktionalem Gradientendesign konnten Forscher die Leistungsgrenzen metallbasierter Verbundwerkstoffe ausloten und theoretische und praktische Referenzen für andere Hochleistungslegierungen liefern. Die Untersuchung des Sintermechanismus und der Mikrostrukturentwicklung von Silber-Wolfram-Legierungen hat das Verständnis des Flüssigphasensinterns und der Grenzflächenbindung vertieft und die Innovation in der Pulvermetallurgietechnologie vorangetrieben.

Zweitens hat die Forschung zur Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit und zum Hochtemperaturverhalten von Silber-Wolfram-Legierungen die Entwicklung extrem widerstandsfähiger Materialien gefördert. Durch die Analyse des Oberflächenverhaltens und der thermischen Spannungsverteilung unter Lichtbogeneinwirkung haben Forscher neue Beschichtungen und Oberflächenmodifizierungstechnologien entwickelt, um die Stabilität von Materialien in Hochstrom- und Hochtemperaturumgebungen zu verbessern. Diese Ergebnisse lassen sich auf die Entwicklung anderer Hochtemperaturlegierungen und Elektromaterialien übertragen. Darüber hinaus hat die Forschung zu umweltfreundlichen Fertigungstechnologien, wie z. B. Niedrigenergie-Sintern und Abfallrecycling, das Konzept der nachhaltigen Entwicklung in die Materialwissenschaft eingeführt und

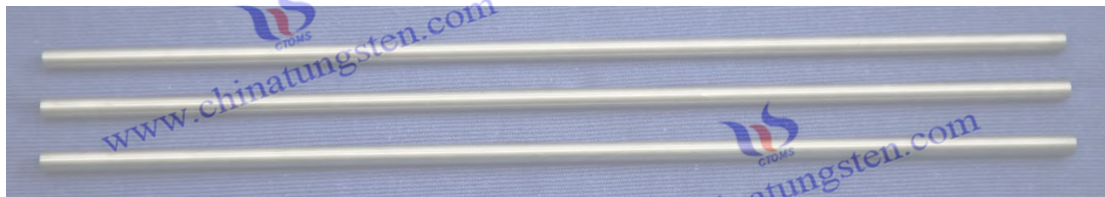
#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

so Ressourcenverschwendung und Umweltbelastung reduziert. Die Forschung an Silber-Wolfram-Legierungen fördert zudem die interdisziplinäre Integration, kombiniert mit computergestützter Materialwissenschaft und künstlicher Intelligenz zur Optimierung des Materialdesigns und beschleunigt die Entwicklung neuer Materialien vom Labor zur industriellen Anwendung. Zukünftig dürfte die Forschung an Silber-Wolfram-Legierungen die Entwicklung intelligenterer und umweltfreundlicherer Verbundwerkstoffe fördern und der Materialwissenschaft neue Dynamik verleihen.

### 1.3.2 Wert der Anwendung in verschiedenen Bereichen

Die industrielle Forschung zu Silber-Wolfram-Legierungen zeigt einen erheblichen Nutzen für Anwendungen in den Bereichen Elektrotechnik, Elektronik, Verteidigung, Luft- und Raumfahrt sowie Medizin. Im Elektrobereich machen ihre hohe Leitfähigkeit und Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit Silber-Wolfram-Legierungen zu idealen Werkstoffen für Hochspannungsschalter, Relais und Schaltkontakte. Durch die Optimierung der Legierungseigenschaften konnte die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Stromversorgungssystemen verbessert und so den Anforderungen von Smart Grids und Hochleistungsgeräten gerecht werden. In der Elektronik werden Silber-Wolfram-Legierungen in HF-Modulen und Leistungshalbleiterkontakten eingesetzt. Ihre hervorragende Wärmeleitfähigkeit und ihre nichtmagnetischen Eigenschaften unterstützen die Entwicklung von 5G-Kommunikationssystemen und Hochleistungsrechnern.

In der Verteidigungs- und Luft- und Raumfahrtbranche machen die hohe Temperaturbeständigkeit und Dichte der Silber-Wolfram-Legierung diese unverzichtbar für Radarelektroden, elektrische Verbindungen von Raketen und Gegengewichtskomponenten von Raumfahrzeugen. Die Forschung hat die Komponentenleistung durch funktionales Gradientendesign und additive Fertigung optimiert und so die Systemgenauigkeit und -zuverlässigkeit verbessert. Im medizinischen Bereich eignet sich die Silber-Wolfram-Legierung aufgrund ihrer Nichtmagnetizität und Biokompatibilität für Kontakte von MRT-Geräten und Strahlentherapie-Abschirmteile. Die Forschung hat die Sicherheit und hohe Präzision der Legierung durch umweltfreundliche Fertigung und Präzisionsbearbeitung sichergestellt. Der Wert der Branchenforschung spiegelt sich auch in der Förderung der branchenübergreifenden Zusammenarbeit wider. Durch die Kombination mit Elektrotechnik, Wärmemanagementtechnologie und intelligenter Fertigung erweitern sich die Anwendungsszenarien der Silber-Wolfram-Legierung ständig, beispielsweise in Ladesystemen für Fahrzeuge mit alternativer Energie und Anlagen für erneuerbare Energien. Zu den Optimierungsrichtungen gehören die Entwicklung kostengünstiger Herstellungsverfahren, die Erforschung multifunktionaler Verbundwerkstoffe und die Integration intelligenter Überwachungstechnologien zur Verbesserung der Anwendungszuverlässigkeit.



CTIA GROUP LTD Silber-Wolfram-Legierung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Kapitel 2 Zusammensetzung und Eigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung

Als Hochleistungsverbundwerkstoff bietet die Silber-Wolfram-Legierung aufgrund ihrer hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, hohen Temperaturbeständigkeit und Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit ein breites Anwendungspotenzial in den Bereichen Elektrotechnik, Elektronik, Verteidigung und Industrie. Die Legierung wird pulvermetallurgisch hergestellt. Silber (Ag) dient als Matrix bzw. Bindephase und sorgt für hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit. Wolfram (W) trägt als Verstärkungsphase zu hohem Schmelzpunkt und hoher Härte bei und erfüllt die hohen Anforderungen in Umgebungen mit hohen Strömen, hohen Temperaturen und hoher Beanspruchung. Die Leistungsfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung hängt direkt von den physikalischen und chemischen Eigenschaften ihrer Hauptbestandteile Silber und Wolfram sowie deren synergistischer Wirkung ab.

### 2.1 Eigenschaften von Silber und Wolfram

Die Leistungsfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung beruht auf den einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften von Silber und Wolfram. Die Komplementarität der beiden Legierungen verleiht ihr eine hervorragende Leistung in elektrischen Kontakten, Schweißelektroden und Hochtemperaturkomponenten. Silber bietet eine hervorragende elektrische und thermische Leitfähigkeit und gewährleistet so eine effiziente Strom- und Wärmeübertragung. Der hohe Schmelzpunkt, die Härte und die Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit von Wolfram erhöhen die Stabilität der Legierung in extremen Umgebungen. Die beiden Legierungen werden pulvermetallurgisch zu einer dichten Mikrostruktur kombiniert, die den Anforderungen hochzuverlässiger Anwendungen gerecht wird.

#### 2.1.1 Physikalische und chemische Eigenschaften von Silber

Silber (Ag) ist ein Edelmetall, das sich unter metallischen Werkstoffen durch seine hervorragende elektrische und thermische Leitfähigkeit auszeichnet. Es bildet die zentrale Matrix bzw. Bindephase in Silber-Wolfram-Legierungen. Silber weist eine extrem hohe elektrische Leitfähigkeit auf, kann Strom effizient übertragen und Widerstandsverluste reduzieren, was es zu einer idealen Wahl für elektrische Kontakte und Elektrodenmaterialien macht. Silber verfügt zudem über eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit, die dazu beiträgt, die beim Betrieb der Komponenten entstehende Wärme schnell abzuleiten und Leistungseinbußen durch Überhitzung zu vermeiden. Im Vergleich zu Wolfram erleichtert der niedrigere Schmelzpunkt die Verflüssigung während des Flüssigphasensinterprozesses der Pulvermetallurgie, benetzt Wolframpartikel, füllt mikroskopische Lücken und bildet eine dichte Legierungsstruktur, wodurch Leitfähigkeit und Strukturstabilität verbessert werden.

Silber weist eine hohe chemische Stabilität und Oxidationsbeständigkeit auf, wodurch es bei Raumtemperatur nur schwer mit Sauerstoff reagiert und gleichzeitig eine glatte Oberfläche und leitfähige Eigenschaften behält. In Umgebungen mit hohen Temperaturen oder schwefelhaltigen Medien kann Silber jedoch leicht oxidieren oder sulfidieren, was zu einem leichten Anstieg des Oberflächenwiderstands führt und die Langzeitleistung beeinträchtigt. Silber ist gut duktil und zäh und kann mechanische Belastungen durch Stöße oder Lichtbögen absorbieren. Dadurch wird das Risiko von

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Rissen in der Legierung in Umgebungen mit hohen Strömen reduziert. Silber hat eine moderate Dichte, die eine gewisse Gewichtsgrundlage für Silber-Wolfram-Legierungen bietet und sich für Anwendungen eignet, die Gegengewichte erfordern. Die nichtmagnetischen Eigenschaften von Silber stellen sicher, dass die Legierung in elektromagnetisch empfindlichen Umgebungen (wie MRT-Geräten oder Radarsystemen) keine Störungen verursacht, was ihre Anwendbarkeit in hochpräzisen elektrischen Systemen verbessert.

In Silber-Wolfram-Legierungen verbessert Silber als leitfähige und wärmeleitende Phase die Stromübertragungseffizienz und das Wärmemanagement der Legierung deutlich. Dadurch eignet sie sich besonders für Anwendungen wie Hochspannungsschalterkontakte, Relais und Widerstandsschweißelektroden. Ihre chemische Stabilität trägt zur Langlebigkeit der Legierung bei häufigem Schalten oder Lichtbogenbildung bei. Um Oxidations- oder Korrosionsproblemen bei hohen Temperaturen vorzubeugen, ist jedoch eine Oberflächenbehandlung oder Komponentenoptimierung erforderlich. Die hohen Silberkosten stellen eine Einschränkung dar. Daher ist es notwendig, Leistung und Wirtschaftlichkeit durch sinnvolle Proportionen und umweltfreundliche Fertigungstechnologie in Einklang zu bringen.

### 2.1.2 Physikalische und chemische Eigenschaften von Wolfram

Wolfram (W) ist ein Übergangsmetall mit hohem Schmelzpunkt. Aufgrund seines extrem hohen Schmelzpunkts, seiner Härte und Dichte wird es als Verstärkungsphase in Silber-Wolfram-Legierungen eingesetzt, um deren Hochtemperaturbeständigkeit und Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit deutlich zu verbessern. Wolfram hat einen extrem hohen Schmelzpunkt und hält extrem hohen Temperaturen stand (wie Lichtbögen oder Schweißprozessen). Dadurch behält es seine strukturelle Stabilität bei Hochstrom- und Hochtemperaturanwendungen. Die extrem hohe Härte von Wolfram verleiht der Legierung eine ausgezeichnete Verschleißfestigkeit und mechanische Schlagfestigkeit. Dadurch eignet sie sich für Anwendungen mit hohem Verschleiß wie Widerstandsschweißelektroden und plasmagespritzten Teilen. Die hohe Dichte von Wolfram bietet einen Gewichtsvorteil für die Legierung und eignet sich daher für Gegengewichts- oder Abschirmanwendungen, wie beispielsweise elektrische Verbindungskomponenten in der Luft- und Raumfahrt.

Geringere elektrische und thermische Leitfähigkeit als Silber, aber die Zugabe von Wolfram verbessert die Beständigkeit der Legierung gegen Lichtbogenkorrosion deutlich. Aufgrund seines hohen Schmelzpunkts und seiner chemischen Stabilität ist Wolfram unter Lichtbogeneinwirkung weniger anfällig für Ablation oder Schmelzen, was die Lebensdauer von Kontakten und Elektroden verlängert. Wolfram ist chemisch stabil und korrosionsbeständig bei Raumtemperatur und in neutraler Umgebung. In oxidierenden oder sauren Umgebungen mit hohen Temperaturen kann es jedoch Oxide bilden, die die Oberflächeneigenschaften beeinträchtigen. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient von Wolfram gewährleistet die Dimensionsstabilität der Legierung während thermischer Zyklen und eignet sich für hochpräzise Komponenten wie Hochspannungsschalterkontakte. Die nichtmagnetischen Eigenschaften von Wolfram entsprechen denen von Silber und unterstützen die Anwendung der Legierung in elektromagnetisch sensiblen Umgebungen. In Silber-Wolfram-Legierungen verbessert Wolfram als Verstärkungsphase die Hochtemperaturbeständigkeit, Verschleißfestigkeit und Lichtbogenfestigkeit der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Legierung deutlich und ermöglicht so einen stabilen Betrieb in rauen elektrischen Umgebungen. Die hohe Härte und Dichte von Wolfram verbessern die mechanische Festigkeit und den Gewichtsausgleich der Legierung, die geringere Leitfähigkeit muss jedoch durch den Matrixeffekt von Silber ausgeglichen werden. Wolfram ist schwierig zu verarbeiten, und komplexe Formen müssen durch Pulvermetallurgie und Präzisionsbearbeitungstechnologie erreicht werden. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Sintereffizienz durch nanoskaliges Wolframpulver oder die Zugabe von Spurenelementen (wie Nickel) zur Verbesserung der Zähigkeit. Die synergistische Wirkung von Silber und Wolfram verleiht der Silber-Wolfram-Legierung einzigartige Vorteile in den Bereichen Elektrik, Elektronik und Verteidigung und erfüllt die Anforderungen von Hochleistungsanwendungen.

### 2.1.3 Silber-Wolfram-Zusammensetzung

Silber-Wolfram-Legierungen bestehen hauptsächlich aus Silber (Ag) und Wolfram (W) und werden üblicherweise pulvermetallurgisch hergestellt. Silber dient als leitfähige und wärmeleitende Matrix, Wolfram als Verstärkungsphase für hohe Temperaturbeständigkeit und Verschleißfestigkeit. Das Verhältnis von Silber zu Wolfram beeinflusst direkt die Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Härte, Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit und Dichte der Legierung und kann je nach Anwendungsanforderungen angepasst werden. Ein höherer Silbergehalt verbessert die Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Legierung und eignet sich daher für Hochspannungskontakte. Ein höherer Wolframgehalt erhöht die Hochtemperaturbeständigkeit und Verschleißfestigkeit der Legierung und eignet sich daher für Schweißelektroden und Hochtemperaturteile. Spuren von Additiven (wie Nickel oder Kobalt) werden manchmal verwendet, um die Zähigkeit oder die Verarbeitungseigenschaften zu verbessern. Diese müssen jedoch streng kontrolliert werden, um die Nichtmagnetizität und die Leistungsstabilität zu gewährleisten. Die folgende Tabelle zeigt die typischen Zusammensetzungen von Silber-Wolfram-Legierungen und ihre Eigenschaften.

| Material | Zusammensetzung<br>(Gewichtsprozent) | Dichte<br>( g / cm <sup>3</sup> ) | Elektrische<br>Leitfähigkeit | Spezifischer<br>Widerstand | Härte<br>(HB) |
|----------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|
| AgW30    | Silber 70 %, Wolfram 30 %            | 11,8-12,2                         | 73                           | 2.3                        | 75            |
| AgW40    | Silber 60 %, Wolfram 40 %            | 12,5-12,8                         | 64                           | 2.6                        | 85            |
| AgW50    | Silber 50 %, Wolfram 50 %            | 13,2-13,5                         | 56-73                        | 2,3-3,0                    | 105           |
| AgW55    | Silber 45 %, Wolfram 55 %            | 13,6-13,9                         | 54                           | 3.2                        | 115           |
| AgW60    | Silber 40 %, Wolfram 60 %            | 14,0-14,4                         | 50-60                        | 2,8-3,3                    | 125           |
| AgW65    | Silber 35 %, Wolfram 65 %            | 14,5-14,9                         | 50                           | 3.4                        | 135           |
| AgW70    | Silber 30 %, Wolfram 70 %            | 14,7-15,1                         | 48                           | 3.5                        | 150           |
| AgW75    | Silber 25 %, Wolfram 75 %            | 15,4-15,8                         | 45-52                        | 3,2-3,7                    | 165           |
| AgW80    | Silber 20 %, Wolfram 80 %            | 16,1-16,5                         | 37                           | 4.5                        | 180           |

**Zusammensetzung und Funktionen** : Silber fungiert als Matrix oder Bindephase in der Legierung. Seine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit gewährleistet eine effiziente Stromübertragung und Wärmeableitung und eignet sich besonders für Anwendungen, die niedrigen Widerstand und hohe

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeableitungseffizienz erfordern, wie z. B. Hochspannungsschalterkontakte. Die Flüssigphasenbenetzbarkeit von Silber fördert die Bindung von Wolframpartikeln während des Sinterprozesses, bildet eine dichte Mikrostruktur und verbessert die Leistungskonsistenz der Legierung.

Wolfram wird als Verstärkungsphase eingesetzt. Sein hoher Schmelzpunkt und seine Härte ermöglichen es der Legierung, in Hochstromlichtbögen oder bei hohen Temperaturen stabil zu bleiben. Seine Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit machen es für häufig geschaltete elektrische Kontakte und Schweißelektroden geeignet. Die hohe Wolframdichte dient als Gegengewicht für die Legierung und macht sie für elektrische Verbindungskomponenten in der Luft- und Raumfahrt geeignet. Spuren von Additiven verbessern die Herstellung komplex geformter Komponenten, indem sie den Flüssigphasensintereffekt und die Zähigkeit der Legierung verbessern. Eine präzise Kontrolle ist jedoch erforderlich, um Magnetismus oder eine verringerte Leitfähigkeit zu vermeiden.

**Auswirkungen auf Leistung und Anwendung :** Ein erhöhter Silbergehalt verbessert die elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit deutlich, kann jedoch Härte und Verschleißfestigkeit verringern und eignet sich daher für Anwendungen mit hohen Stromübertragungsanforderungen. Ein erhöhter Wolframgehalt verbessert die Hochtemperaturbeständigkeit und Lichtbogenfestigkeit, verringert jedoch die elektrische Leitfähigkeit und eignet sich daher für Umgebungen mit hohen Temperaturen und hohem Verschleiß. Die Optimierung des Zusammensetzungsverhältnisses muss je nach Anwendungsanforderungen abgewogen werden. Beispielsweise weisen Kontakte von Hochspannungsschaltern tendenziell einen hohen Silbergehalt auf, um die Leitfähigkeit zu gewährleisten, während Widerstandsschweißelektroden einen hohen Wolframgehalt für eine verbesserte Verschleißfestigkeit bevorzugen. Der nicht magnetische und niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient der Legierung bietet Vorteile in elektromagnetisch sensiblen und hochpräzisen Anwendungen (wie MRT-Geräten und Radarsystemen). Im Herstellungsprozess werden Hochenergie-Kugelmahlen, Flüssigphasensintern und Heißisostatisches Pressen (HIP) eingesetzt, um die Gleichmäßigkeit und Dichte der Zusammensetzung zu gewährleisten und so hohe Zuverlässigkeitsanforderungen zu erfüllen. Optimierungsansätze umfassen die Verbesserung der Leistungskonsistenz durch nanoskalige Pulver, die Optimierung der Silber-Wolfram-Verteilung durch funktionales Gradientendesign oder die Entwicklung umweltfreundlicher Fertigungstechnologien zur Senkung der Silberkosten. Aufgrund ihrer flexiblen Zusammensetzung weisen Silber-Wolfram-Legierungen einen breiten Anwendungsbereich in den Bereichen Elektrik, Elektronik und Verteidigung auf.

## 2.2 Einfluss des Zusammensetzungsverhältnisses der Silber-Wolfram-Legierung

Das Zusammensetzungsverhältnis einer Silber-Wolfram-Legierung ist ein entscheidender Faktor für ihre mechanischen Eigenschaften und ihre Anwendungsleistung. Das Verhältnis von Silber (Ag) und Wolfram (W) bestimmt direkt die Biegefestigkeit, Zähigkeit, elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit der Legierung. Durch Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses kann ein Gleichgewicht zwischen Leitfähigkeit und mechanischen Eigenschaften erreicht werden, um den Anforderungen verschiedener Anwendungsszenarien gerecht zu werden. Ein hoher Silbergehalt verbessert die Leitfähigkeit und Zähigkeit der Legierung, was sie für elektrische Hochstromkontakte

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

geeignet macht. Ein hoher Wolframgehalt verbessert die Biegefestigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit der Legierung, was sie für Schweißelektroden und stark beanspruchte Teile geeignet macht. Die spezifischen Auswirkungen des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf Biegefestigkeit und Zähigkeit werden im Folgenden detailliert analysiert.

### 2.2.1 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Biegefestigkeit der Legierung

Silber -Wolfram-Verhältnis hat einen erheblichen Einfluss auf die Biegefestigkeit der Legierung. Darunter versteht man die Fähigkeit der Legierung, Verformungen oder Brüchen unter Biegebelastung zu widerstehen, und es steht in direktem Zusammenhang mit ihrer Zuverlässigkeit in Umgebungen mit mechanischer Belastung. Bei einem hohen Silbergehalt ist die Biegefestigkeit der Legierung gering, da Silber aufgrund seiner Duktilität und geringen Härte großen Biegespannungen nur schwer standhalten kann. Silber eignet sich daher nicht für elektrische Kontaktanwendungen mit geringer dynamischer Belastung. Silber benetzt als Matrix oder Bindephase die Wolframpartikel während des Flüssigphasensinterprozesses. Obwohl es die Strukturichte erhöht, begrenzt seine geringe Festigkeit die Leistung der Legierung in Situationen mit hoher Belastung. Mit steigendem Wolframgehalt nimmt die Biegefestigkeit deutlich zu, da die hohe Härte und der hohe Schmelzpunkt von Wolfram der Legierung eine stärkere Steifigkeit und Verformungsbeständigkeit verleihen. Wolframpartikel bilden in der Legierung eine Skelettstruktur, die die mechanische Stabilität des Materials insgesamt verbessert. Insbesondere bei hohem Wolframgehalt erreicht die Biegefestigkeit einen Höhepunkt, was für Teile geeignet ist, die eine hohe Verschleißfestigkeit und strukturelle Stabilität erfordern.

Das Silber -Wolfram-Verhältnis beeinflusst auch die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur. Ein zu hoher Silbergehalt kann zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Wolframpartikel führen und die Stabilität der Biegefestigkeit verringern. Ein zu hoher Wolframgehalt kann aufgrund unzureichender flüssiger Silberphase Poren bilden und so die Gleichmäßigkeit der mechanischen Eigenschaften beeinträchtigen. Die Optimierung von Sinterprozessen (wie Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen) kann diese Probleme lindern und die Biegefestigkeit durch Erhöhung der Dichte und Reduzierung von Defekten verbessern. Durch die Verbesserung der Biegefestigkeit eignen sich Silber-Wolfram-Legierungen gut für Widerstandsschweißelektroden, plasmagespritzte Teile und Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt und halten mechanischen Stößen und Vibrationen stand. Zu den Optimierungsansätzen gehören die Verbesserung der Partikelverteilung durch nanoskaliges Wolframpulver oder die Erhöhung des Wolframgehalts auf der Oberfläche durch ein funktionales Gradientendesign zur Verbesserung der Biegefestigkeit. Eine sinnvolle Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses leistet wichtige Unterstützung für Anwendungen mit hoher Zuverlässigkeit, insbesondere in Szenarien, in denen sowohl Leitfähigkeit als auch mechanische Festigkeit berücksichtigt werden müssen.

### 2.2.2 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Zähigkeit der Legierung

Das Silber-Wolfram-Verhältnis hat einen wichtigen Einfluss auf die Zähigkeit der Legierung. Dies beschreibt die Fähigkeit der Legierung, Energie zu absorbieren und Bruch zu widerstehen. Es bestimmt

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



ihre Beständigkeit gegen Stöße oder Lichtbögen. Ein höherer Silbergehalt erhöht die Zähigkeit der Legierung, da die Duktilität und Plastizität des Silbers mechanische Stöße und thermische Belastungen absorbieren und so das Risiko der Rissausbreitung verringern. Diese Eigenschaft macht Silber-Wolfram-Legierungen mit hohem Silbergehalt für elektrische Anwendungen geeignet, die häufiges Schalten erfordern, wie z. B. Kontakte für Hochspannungs-Leistungsschalter und Relais. Die Zähigkeit des Silbers trägt dazu bei, die durch Lichtbögen verursachte Spannungskonzentration zu verringern und die Lebensdauer der Komponenten zu verlängern. Die geringere Härte des Silbers kann jedoch in Umgebungen mit hoher Beanspruchung zu Verformungen führen und so die Leistung unter extremen mechanischen Belastungen einschränken.

Mit steigendem Wolframgehalt nimmt die Zähigkeit der Legierung allmählich ab, da die hohe Härte und Sprödigkeit von Wolfram die Fähigkeit des Materials zur plastischen Verformbarkeit schwächen. Ein hoher Wolframgehalt macht die Legierung steifer und geeignet für Anwendungen mit hoher Temperaturbeständigkeit und Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit, wie z. B. Schweißelektroden und Hochtemperaturformen, aber ihre geringere Zähigkeit kann bei Aufprall oder thermischen Zyklen Mikrorisse verursachen. Die benetzende Wirkung von Silber als Bindephase mildert die Sprödigkeit zwischen den Wolframpartikeln bis zu einem gewissen Grad, aber bei zu hohem Wolframgehalt kann eine unzureichende Flüssigphase Mikrodefekte verursachen und die Zähigkeit weiter reduzieren. Eine Optimierung des Sinterprozesses, wie z. B. Funkenplasmasintern (SPS) oder die Zugabe von Spurenelementen, kann die Mikrostruktur verbessern und die Zähigkeit erhöhen, insbesondere bei Legierungen mit hohem Wolframgehalt.

Veränderungen der Zähigkeit wirken sich direkt auf die Anwendungsszenarien von Silber-Wolfram-Legierungen aus. Legierungen mit hohem Silbergehalt eignen sich aufgrund ihrer hervorragenden Zähigkeit für dynamische elektrische Umgebungen, wie z. B. Smart-Grid-Schalter und elektronische HF-Module. Legierungen mit hohem Wolframgehalt eignen sich aufgrund ihrer hohen Temperaturbeständigkeit und Härte für statische oder stark beanspruchte Teile, wie z. B. Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt und plasmagespritzte Teile. Optimierungsansätze umfassen die Verbesserung der Dispergierbarkeit von Wolframpartikeln durch nanostrukturiertes Design oder die Entwicklung von Verbundbeschichtungen zur Verbesserung der Oberflächenzähigkeit. Die Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses muss ein Gleichgewicht zwischen Zähigkeit und Härte entsprechend den Anwendungsanforderungen gewährleisten. Beispielsweise sollte der Silberanteil erhöht werden, wenn Schlagfestigkeit erforderlich ist, und der Wolframanteil, wenn hohe Temperaturbeständigkeit erforderlich ist. Durch eine angemessene Kontrolle des Komponentenverhältnisses und des Herstellungsprozesses zeigen Silber-Wolfram-Legierungen eine hervorragende Gesamtleistung in den Bereichen Elektrik, Elektronik und Verteidigung.

### 2.2.3 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Leitfähigkeit der Legierung

Das Silber-Wolfram-Verhältnis hat einen erheblichen Einfluss auf die Leitfähigkeit der Legierung, die ein wichtiger Indikator für ihre Stromübertragungsfähigkeit ist und in direktem Zusammenhang mit ihrer Leistung in elektrischen Kontakten und Elektroden steht. Ein hoher Silbergehalt erhöht die Leitfähigkeit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Legierung deutlich. Da Silber eine extrem hohe elektrische Leitfähigkeit besitzt, reduziert es als Matrix oder Bindungsphase effektiv Widerstandsverluste und eignet sich daher für Hochstromanwendungen wie Hochspannungs-Leistungsschalterkontakte, Relais und HF-Module. Silber benetzt die Wolframpartikel während des Flüssigphasensinterprozesses und bildet ein durchgehendes leitfähiges Netzwerk, wodurch die Stromübertragungseffizienz weiter verbessert wird. Mit steigendem Wolframgehalt nimmt die Leitfähigkeit allmählich ab. Da die Leitfähigkeit von Wolfram viel geringer ist als die von Silber, verringert ein hoher Wolframgehalt den leitfähigen Pfad und erhöht den Widerstand, wodurch die Leistung der Legierung bei Hochstrombelastung eingeschränkt wird.

Das Silber -Wolfram-Verhältnis beeinflusst auch die Leitfähigkeit der Mikrostruktur. Ein zu hoher Silbergehalt kann zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Wolframpartikel und einer eingeschränkten lokalen Leitfähigkeit führen. Ein zu hoher Wolframgehalt kann aufgrund einer unzureichenden flüssigen Silberphase Poren bilden und so den Kontaktwiderstand erhöhen. Eine Optimierung des Sinterprozesses, beispielsweise durch Hochenergie-Kugelmahlen und heißisostatisches Pressen, kann die Gleichmäßigkeit und Dichte der Zusammensetzung verbessern und die Leitfähigkeitsstabilität erhöhen. Durch die verbesserte Leitfähigkeit eignen sich Silber-Wolfram-Legierungen gut für Smart-Grid-Schalter und elektronische Geräte und erfüllen die Anforderungen an niedrigen Widerstand und effiziente Übertragung. Optimierungsansätze umfassen die Verbesserung des leitfähigen Netzwerks durch nanoskaliges Silberpulver oder die Erhöhung des Silberanteils im leitfähigen Bereich durch ein funktionales Gradientendesign. Eine sinnvolle Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses leistet wichtige Unterstützung für hochzuverlässige elektrische Anwendungen, insbesondere in Szenarien, in denen eine effiziente Leitfähigkeit erforderlich ist.

#### 2.2.4 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Wärmeleitfähigkeit der Legierung

Das Silber -Wolfram-Verhältnis hat einen wichtigen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit der Legierung. Die Wärmeleitfähigkeit ist ein wichtiger Indikator für die Fähigkeit der Legierung, Wärme abzuleiten, und steht in direktem Zusammenhang mit ihrer Stabilität und Wärmeableitungsleistung in Hochtemperaturumgebungen. Ein hoher Silbergehalt erhöht die Wärmeleitfähigkeit der Legierung deutlich. Aufgrund der hervorragenden Wärmeleitfähigkeit kann Silber als Matrix oder Bindungsphase Wärme schnell übertragen und so Leistungseinbußen durch Überhitzung vorbeugen. Silber eignet sich für Leistungshalbleiterkontakte und elektronische Wärmeableitungssubstrate. Das während des Sinterprozesses durch Silber gebildete Flüssigphasennetzwerk fördert eine gleichmäßige Wärmeverteilung und verbessert die Wärmeableitungseffizienz. Mit steigendem Wolframgehalt nimmt die Wärmeleitfähigkeit allmählich ab. Da die Wärmeleitfähigkeit von Wolfram geringer ist als die von Silber, verkürzt ein hoher Wolframgehalt den Wärmeleitungsweg und schränkt so die Leistung der Legierung bei hoher Wärmebelastung ein.

Das Silber -Wolfram-Verhältnis beeinflusst auch die Gleichmäßigkeit der Wärmeleitung. Ein zu hoher Silbergehalt kann zu ungleichmäßiger Wärmeausdehnung führen und die Langzeitstabilität beeinträchtigen. Ein zu hoher Wolframgehalt kann aufgrund einer unzureichenden flüssigen Silberphase Wärmewiderstandspunkte bilden und so die Wärmeleitfähigkeit verringern. Durch die Optimierung von

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sinterprozessen, wie etwa Funkenplasmasintern (SPS) und Oberflächenbehandlung, können Porosität und Defekte verringert und die Konsistenz der Wärmeleitfähigkeit verbessert werden. Durch die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit eignen sich Silber-Wolfram-Legierungen gut für elektronische Hochtemperaturgeräte und Luft- und Raumfahrtkomponenten und erfüllen die Anforderungen an effiziente Wärmeableitung und Wärmemanagement. Zu den Optimierungsansätzen gehören die Optimierung des Wärmeleitungsnetzwerks durch nanoskaliges Silberpulver oder die Verwendung von Verbundbeschichtungen zur Verbesserung der Wärmeableitungsfähigkeiten der Oberfläche. Das Silber-Wolfram-Verhältnis muss angepasst werden, um Wärmeleitfähigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit je nach Anwendungsanforderungen ins Gleichgewicht zu bringen, etwa durch Erhöhung des Silberanteils im Wärmeableitungssubstrat und Erhöhung des Wolframanteils in der Hochtemperaturstruktur.

### 2.2.5 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Legierungsdichte

Das Verhältnis von Silber zu Wolfram hat einen erheblichen Einfluss auf die Dichte der Legierung, die ein wichtiger Indikator für die Masse pro Volumeneinheit der Legierung ist und in direktem Zusammenhang mit ihrer Leistung in Gegengewichts- und Abschirmanwendungen steht. Bei höheren Silbergehalten weist die Legierung eine moderate Dichte auf, die niedriger als die von Wolfram, aber höher als die vieler anderer Metalle ist. Dadurch eignet sie sich für elektrische Kontaktanwendungen, die ein gewisses, aber nicht zu hohes Gewicht erfordern. Ein zu hoher Silbergehalt kann jedoch die Gesamtdichte verringern und die Leistung in Szenarien mit hohem Gegengewicht einschränken. Mit steigendem Wolframgehalt nimmt die Dichte der Legierung deutlich zu. Da Wolfram eine extrem hohe Dichte aufweist, verbessert es die Gegengewichts- und Strahlenabschirmungsfähigkeit und eignet sich daher für Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt sowie für Abschirmteile in der medizinischen Strahlentherapie.

Das Silber-Wolfram-Verhältnis beeinflusst auch die Gleichmäßigkeit der Dichte. Ein zu hoher Silbergehalt kann zu einer ungleichmäßigen Sedimentation von Wolframpartikeln führen und so die lokale Dichte beeinträchtigen. Ein zu hoher Wolframgehalt kann aufgrund unzureichender Silber-Flüssigphase Poren bilden und so die Gesamtdichte verringern. Durch die Optimierung des Sinterprozesses, wie z. B. Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen, können Zusammensetzungsverteilung und Dichte verbessert werden. Durch die erhöhte Dichte eignen sich Silber-Wolfram-Legierungen gut für Anwendungen, die einen hohen Gewichtsausgleich oder Strahlenschutz erfordern, und erfüllen die Anforderungen des dynamischen Gleichgewichts in der Luft- und Raumfahrt sowie des medizinischen Strahlenschutzes. Optimierungsansätze umfassen die Verbesserung der Partikelverteilung durch nanoskaliges Wolframpulver oder die Erhöhung des Wolframanteils im Gewichtsausgleichsbereich durch ein funktionales Gradientendesign.

### 2.2.6 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Legierungshärte

Das Silber-Wolfram-Verhältnis beeinflusst maßgeblich die Härte der Legierung, also ihre Widerstandsfähigkeit gegen Oberflächeneindrücke und Verschleiß. Dies steht in direktem Zusammenhang mit ihrer Haltbarkeit in mechanisch beanspruchten Umgebungen. Bei hohem

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Silbergehalt ist die Härte der Legierung gering, da die Duktilität und die geringe Härte von Silber die Beständigkeit gegen Oberflächenverschleiß erschweren. Daher eignet sich Silber für elektrische Kontaktanwendungen mit geringer dynamischer Belastung. Silber fungiert als Matrix oder Bindephase und benetzt die Wolframpartikel während des Flüssigphasensinterprozesses. Obwohl es die Strukturdicke erhöht, schränkt seine geringe Härte die Leistung der Legierung bei hohem Verschleiß ein. Mit steigendem Wolframgehalt steigt die Härte deutlich an, da die hohe Härte und der hohe Schmelzpunkt von Wolfram der Legierung eine höhere Druck- und Verschleißfestigkeit verleihen. Wolframpartikel bilden in der Legierung eine Skelettstruktur, die die Oberflächenbeständigkeit des Materials erhöht. Insbesondere bei hohem Wolframgehalt erreicht die Härte einen Höchstwert und eignet sich für Teile, die eine hohe Verschleißfestigkeit erfordern.

Das Silber-Wolfram-Verhältnis beeinflusst auch die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur. Ein zu hoher Silbergehalt kann zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Wolframpartikel führen und die Härtestabilität verringern. Ein zu hoher Wolframgehalt kann aufgrund einer unzureichenden flüssigen Silberphase Poren bilden und so die Gleichmäßigkeit der mechanischen Eigenschaften beeinträchtigen. Durch die Optimierung von Sinterprozessen, wie etwa Funkenplasmasintern (SPS) oder heißisostatischem Pressen (HIP), können die Dichte erhöht, Defekte reduziert und die Härtekonsistenz verbessert werden. Durch die erhöhte Härte eignen sich Silber-Wolfram-Legierungen gut für Widerstandsschweißelektroden, plasmagespritzte Teile und Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt und sind zudem widerstandsfähiger gegen mechanische Abnutzung und Oberflächeneinwirkung. Zu den Optimierungsansätzen gehören die Verbesserung der Partikelverteilung durch nanoskaliges Wolframpulver oder die Verwendung von oberflächenhärtenden Beschichtungen (wie etwa TiN) zur weiteren Verbesserung der Härte.

### 2.2.7 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Hochtemperaturbeständigkeit der Legierung

Das Silber-Wolfram-Verhältnis hat großen Einfluss auf die Hochtemperaturbeständigkeit der Legierung. Hochtemperaturbeständigkeit ist die Fähigkeit der Legierung, in einer Hochtemperaturumgebung ihre strukturelle Stabilität und Leistung aufrechtzuerhalten, was in direktem Zusammenhang mit ihrer Zuverlässigkeit in Hochtemperaturanwendungen steht. Bei einem hohen Silbergehalt ist die Hochtemperaturbeständigkeit der Legierung geringer, da Silber einen niedrigen Schmelzpunkt hat und bei hohen Temperaturen leicht erweicht oder schmilzt, was seinen Einsatz in extremen Temperaturumgebungen einschränkt. Silber fungiert als Bindephase, um die Wolframpartikel während des Sinterns zu benetzen, seine geringe thermische Stabilität kann jedoch bei Hochstrom- oder Hochtemperaturvorgängen zu Leistungseinbußen führen. Mit zunehmendem Wolframgehalt wird die Hochtemperaturbeständigkeit deutlich verbessert, da der hohe Schmelzpunkt und die thermische Stabilität von Wolfram der Legierung eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen thermische Verformung verleihen. Bei einem hohen Wolframgehalt kann die Legierung bei Hochtemperaturlichtbögen oder Schweißen ihre strukturelle Integrität bewahren, wodurch sie sich für Teile eignet, die Hochtemperaturbeständigkeit erfordern. Das Silber-Wolfram-Verhältnis beeinflusst auch die Stabilität während thermischer Zyklen. Ein zu hoher Silbergehalt kann zu ungleichmäßiger Wärmeausdehnung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



führen und das Risiko thermischer Spannungen erhöhen; ein zu hoher Wolframgehalt kann aufgrund unzureichender Silber-Flüssigphase Mikrorisse bilden, was die Gleichmäßigkeit bei hohen Temperaturen beeinträchtigt. Eine Optimierung des Sinterprozesses, beispielsweise durch stufenweises Erhitzen und heißisostatisches Pressen, kann die Dichte der Mikrostruktur verbessern und die Hochtemperaturkonstanz erhöhen. Durch die verbesserte Hochtemperaturbeständigkeit eignen sich Silber-Wolfram-Legierungen gut für den Einsatz in elektronischen Hochtemperaturgeräten, Raketendüsenkomponenten und Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt und erfüllen die Anforderungen extremer thermischer Umgebungen. Optimierungsansätze umfassen die Optimierung der thermischen Spannungsverteilung durch funktionales Gradientendesign oder die Entwicklung hochtemperaturbeständiger Beschichtungen zur Verbesserung der Oberflächenstabilität. Die Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses muss Hochtemperaturbeständigkeit und Leitfähigkeit je nach Anwendungsanforderungen ausbalancieren, beispielsweise durch Erhöhung des Wolframanteils in Hochtemperaturstrukturen bei moderatem Silberanteil in leitfähigen Komponenten.

### 2.2.8 Einfluss des Silber-Wolfram-Verhältnisses auf die Lichtbogenerosionsbeständigkeit der Legierung

Das Silber -Wolfram-Verhältnis beeinflusst maßgeblich die Lichtbogenerosionsbeständigkeit der Legierung, also die Widerstandsfähigkeit der Legierung gegen Lichtbogenablation und Materialverlust. Dies steht in direktem Zusammenhang mit ihrer Lebensdauer in Hochstromkontakten. Ein hoher Silbergehalt verringert die Lichtbogenerosionsbeständigkeit der Legierung, da der niedrigere Schmelzpunkt und die chemische Aktivität des Silbers ein leichtes Schmelzen oder Ablatieren unter Lichtbogeneinwirkung ermöglichen. Dies eignet sich für Anwendungen mit geringer Lichtbogenintensität. Silber dient während des Sinterprozesses als Matrix zur Benetzung der Wolframpartikel, kann jedoch in Hochstromumgebungen den Oberflächenverlust beschleunigen. Mit steigendem Wolframgehalt erhöht sich die Lichtbogenerosionsbeständigkeit deutlich, da der hohe Schmelzpunkt und die chemische Stabilität des Wolframs ein Schmelzen oder Oxidieren unter dem Lichtbogen erschweren. Dies verlängert die Lebensdauer von Kontakten und Elektroden. Ein hoher Wolframgehalt bewahrt die Oberflächenintegrität der Legierung auch bei häufigem Schalten oder Hochstromumgebungen und ist somit für Bauteile mit hoher Lichtbogenbeständigkeit geeignet.

Silber -Wolfram-Verhältnis beeinflusst die Gleichmäßigkeit des Lichtbogens. Ein zu hoher Silbergehalt kann dazu führen, dass sich der Lichtbogen lokal konzentriert abträgt; ein zu hoher Wolframgehalt kann aufgrund unzureichender Silber-Flüssigphase eine inhomogene Struktur bilden und so die Korrosionsbeständigkeit beeinträchtigen. Optimierte Sinterprozesse, wie z. B. Vakuumsintern und Oberflächenbehandlung, können Oxidation und Defekte reduzieren und die Lichtbogenerosionsbeständigkeit verbessern. Durch die verbesserte Lichtbogenerosionsbeständigkeit eignen sich Silber-Wolfram-Legierungen hervorragend für Hochspannungs-Leistungsschalterkontakte, Relais und Widerstandsschweißelektroden und erfüllen die Anforderungen an hohe Ströme und häufige Einsätze. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Oberflächengleichmäßigkeit durch nanoskaliges Wolframpulver oder die Verwendung lichtbogenbeständiger Beschichtungen (wie ZrC ), um die Korrosionsbeständigkeit weiter zu verbessern.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2.3 Leistungsanalyse der Silber-Wolfram-Legierung

Die hohe Leistungsfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung beruht auf ihrer einzigartigen Mikrostruktur und der Synergie ihrer Zusammensetzung. Ihre Härte, Hochtemperaturbeständigkeit, Lichtbogenerosionsbeständigkeit und weitere Eigenschaften machen sie für eine Vielzahl anspruchsvoller Anwendungen geeignet. Die Leistungsanalyse der Legierung muss vom mikroskopischen Mechanismus, dem Materialdesign und den Anwendungsanforderungen ausgehen und systematisch den Härtebildungsprozess, die Hochtemperaturbeständigkeit und die Vorteile der Lichtbogenerosionsbeständigkeit analysieren. Diese Eigenschaften werden durch die Optimierung des Pulvermetallurgieprozesses erreicht, um die Zuverlässigkeit der Legierung in elektrischen Kontakten, Schweißelektroden und Luft- und Raumfahrtkomponenten zu gewährleisten.

### 2.3.1 Entstehungsmechanismus und Vorteile der hohen Härte der Silber-Wolfram-Legierung

Die hohe Härte der Silber-Wolfram-Legierung ist ihr Hauptvorteil in Umgebungen mit hohem Verschleiß und mechanischer Belastung. Sie macht sie widerstandsfähiger gegen Oberflächeneindrücke, Verschleiß und Stöße und verlängert die Lebensdauer von Komponenten. Die Härte entsteht durch die hohe Eigenhärte des Wolframs und die Mikrooptimierung der Silber-Wolfram-Verbundstruktur während des Sinterprozesses. Silber benetzt als Bindephase die Wolframpartikel beim Flüssigphasensintern und erhöht so die Dichte der Struktur, während Wolfram als Verstärkungsphase für ein Skelett mit hoher Härte sorgt. Durch diesen Synergieeffekt eignet sich die Silber-Wolfram-Legierung gut für Widerstandsschweißelektroden, plasmagespritzte Komponenten und Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt, da sie mechanischer Abnutzung und Oberflächenschäden standhält. Der Vorteil der hohen Härte besteht darin, dass sie die Widerstandsfähigkeit der Legierung gegen Verformung verbessert, insbesondere in Umgebungen mit hohen Strömen oder hohen Temperaturen. Die Legierungsoberfläche bleibt intakt und Leistungseinbußen werden vermieden.

#### 2.3.1.1 Mikrostruktureller Mechanismus hoher Härte

Der Mechanismus zur Entstehung der hohen Härte einer Silber-Wolfram-Legierung hängt hauptsächlich von der einzigartigen Gestaltung ihrer Mikrostruktur und der Wechselwirkung während des Sinterns ab. Dieser Vorgang wird durch ein pulvermetallurgisches Verfahren realisiert, das Schritte wie Pulvermischen, Pressen, Flüssigphasensintern und Nachbearbeitung umfasst. Der Kern des mikrostrukturellen Mechanismus liegt in der Verteilung der Wolframpartikel in der Silbermatrix, dem Benetzungseffekt des Flüssigphasensinterns und dem synergistischen Effekt der Korngrenzenverstärkung. Wolfram ist zunächst einmal eine verstärkende Phase mit hoher Härte. Seine Partikel werden beim Pulvermischen durch eine Hochenergie-Kugelmühle gleichmäßig verteilt. Die Optimierung von Partikelgröße und -form stellt die Bildung einer gleichmäßigen Skelettstruktur nach dem Pressen sicher. Aufgrund seines hohen Schmelzpunkts bleibt Wolfram während des Sinterns in einem festen Zustand und verformt oder schmilzt nicht so leicht. Es bietet der Legierung eine starre Stütze und verbessert die Härtegrundlage erheblich. Silber, eine niedrigschmelzende Bindephase, schmilzt beim Flüssigphasensintern zu einer Flüssigkeit, benetzt die Wolframpartikel und füllt deren

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zwischenräume. Dieser Prozess wird durch Kapillarwirkung und Diffusionsmechanismen erreicht, wodurch Mikroporen eliminiert und die Dichte der Legierung verbessert wird.

Der Benetzungseffekt des Flüssigphasensinterns ist ein wichtiger Schritt zur Ausbildung hoher Härte. Die flüssige Silberphase durchdringt bei hohen Temperaturen die mikroskopischen Defekte auf der Oberfläche der Wolframpartikel, verbessert die Bindungskraft zwischen den Partikeln und bildet eine dichte Grenzflächenstruktur. Diese Grenzflächenbindung verbessert nicht nur die Gesamtfestigkeit des Materials, sondern steigert durch die Korngrenzenverstärkung auch zusätzlich die Härte. Die Korngrenzenverstärkung entsteht durch die Silberphasenschicht zwischen den Wolframpartikeln. Die Duktilität von Silber puffert bis zu einem gewissen Grad Spannungskonzentrationen ab, jedoch dominiert die hohe Härte von Wolfram den Oberflächenwiderstand der Legierung. Während des Sinterprozesses wird durch die Anwendung von Heißisostatischem Pressen (HIP) oder Funkenplasmasintern (SPS) die Mikrostruktur weiter optimiert, Restporen durch Hochspannung und Impulsstrom beseitigt, Korngrenzen komprimiert, eine engere Anordnung der Wolframpartikel bewirkt und der Härtegrad deutlich verbessert. Darüber hinaus spielen auch Geometrie und Ausrichtung der Wolframpartikel bei der Ausbildung der Härte eine Rolle. Regelmäßige oder polyedrische Wolframpartikel können Spannungen effektiver verteilen und die Druck- und Verschleißfestigkeit verbessern.

Die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur ist ein wichtiger Faktor für die Bildung einer hohen Härte. Bei einem moderaten Silbergehalt reicht die flüssige Phase aus, um die Lücken zwischen den Wolframpartikeln zu füllen. Dadurch werden Poren durch unzureichende flüssige Phase oder ungleichmäßige Partikelablagerung durch übermäßige flüssige Phase vermieden. Die Kontrolle der Sinteratmosphäre verhindert Oxidation oder das Eindringen von Verunreinigungen, erhält die Reinheit von Wolfram und Silber und gewährleistet die Stabilität der Mikrostruktur. Die Verwendung von nanoskaligem Wolframpulver verbessert den Härtemechanismus zusätzlich, erhöht die Korngrenzendichte durch Reduzierung der Partikelgröße und verbessert die Fähigkeit der Korngrenzen, Versetzungen zu blockieren. Dadurch wird die Verformungsbeständigkeit der Legierung deutlich verbessert. Der Volumenanteil der Wolframpartikel in der Mikrostruktur hat ebenfalls einen direkten Einfluss auf die Härte. Je höher der Wolframgehalt, desto deutlicher ist der härtesteigernde Effekt. Die Benetzungswirkung des Silbers muss jedoch ausgeglichen werden, um eine erhöhte Sprödigkeit zu vermeiden.

Der durch die hohe Härte gebildete mikrostrukturelle Mechanismus verleiht der Silber-Wolfram-Legierung viele Vorteile. Erstens macht die hohe Härte die Legierung widerstandsfähiger gegen mechanischen Verschleiß und Oberflächeneindrücke. Dies eignet sich besonders für Anwendungen mit hohem Verschleiß wie Widerstandsschweißelektroden und plasmagespritzte Teile und bewahrt die Oberflächenintegrität bei häufigem mechanischem Kontakt. Zweitens verbessert die hohe Härte die Widerstandsfähigkeit der Legierung gegen Verformungen in Hochtemperaturumgebungen. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram und der Verdichtungseffekt von Silber verringern die Wahrscheinlichkeit, dass die Legierung beim Lichtbogen- oder Hochtemperaturschweißen erweicht oder schmilzt, was ihre Lebensdauer verlängert. Darüber hinaus unterstützt die hochharte Mikrostruktur die Bearbeitung komplex geformter Teile. Durch die Präzisionsbearbeitungstechnologie werden hochpräzise Kontakte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Elektroden hergestellt. Die optimierte Mikrostruktur verbessert zudem die Ermüdungsbeständigkeit der Legierung und reduziert das Risiko von Mikrorissen durch Temperaturwechselbeanspruchung oder mechanische Stöße. Dadurch eignet sie sich besonders für Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt sowie für elektrische Verbindungskomponenten im Verteidigungsbereich.

Die Bildung hoher Härte bringt jedoch auch gewisse Herausforderungen mit sich. Ein zu hoher Wolframgehalt kann die Sprödigkeit der Legierung erhöhen, insbesondere wenn die flüssige Silberphase nicht ausreicht, da die Gefahr von Mikrorissen steigt. Eine präzise Kontrolle des Sinterprozesses und der Nachbehandlung (z. B. durch eine oberflächenhärtende Beschichtung) ist der Schlüssel zur Lösung dieses Problems. Optimierungsrichtungen umfassen die Entwicklung von Nanokompositstrukturen zur Verbesserung des Gleichgewichts zwischen Zähigkeit und Härte oder die Erhöhung des Wolframgehalts an der Oberfläche durch ein funktionales Gradientendesign zur Verbesserung der lokalen Härte. Kurz gesagt: Der mikrostrukturelle Mechanismus der hohen Härte der Silber-Wolfram-Legierung verleiht der Legierung durch den synergistischen Effekt von starrem Wolframträger, Silberbenetzung und -verdichtung sowie Korngrenzenverstärkung eine hervorragende Verschleißfestigkeit und Verformungsbeständigkeit und legt damit eine solide Grundlage für ihre breite Anwendung in den Bereichen Elektrotechnik, Elektronik und Verteidigung.

### 2.3.1.2 Vorteile hoher Härte bei verschleißfesten Anwendungen

Die hohe Härte der Silber-Wolfram-Legierung bietet erhebliche Anwendungsvorteile in verschleißfesten Szenarien und macht sie zu einem idealen Material für Umgebungen mit hoher Beanspruchung. Verschleißfestigkeit ist die Fähigkeit einer Legierung, Oberflächenverschleiß, Abrieb und mechanischen Beschädigungen zu widerstehen, was sich direkt auf ihre Lebensdauer bei häufigem Kontakt oder Anwendungen mit hoher Belastung auswirkt. Die hohe Härte der Silber-Wolfram-Legierung ist hauptsächlich auf die hohe Eigenhärte von Wolfram zurückzuführen. Die Wolframpartikel bilden während des Sinterprozesses eine feste Skelettstruktur, die die Widerstandsfähigkeit der Legierungsoberfläche gegen mechanischen Verschleiß deutlich erhöht. Silber benetzt als Bindephase die Wolframpartikel durch Flüssigphasensintern, füllt die mikroskopischen Lücken, bildet eine dichte Mikrostruktur und verbessert die Oberflächenhaltbarkeit weiter. Diese hohe Härte ermöglicht es der Silber-Wolfram-Legierung, hochfrequentem mechanischem Kontakt, Reibung und Stößen standzuhalten, insbesondere in Szenarien, die einen langfristig stabilen Betrieb erfordern.

In speziellen Anwendungen im Bereich der Verschleißfestigkeit sorgt die hohe Härte der Silber-Wolfram-Legierung für hervorragende Leistung in Widerstandsschweißelektroden. Schweißelektroden berühren Werkstücke häufig unter hohen Strom- und Temperaturbedingungen. Herkömmliche Materialien wie reines Silber oder kupferbasierte Legierungen neigen aufgrund ihrer geringeren Härte zu Oberflächenverschleiß, was zu Verformungen der Elektrodenform und einer Verschlechterung der Schweißqualität führt. Die hohe Härte der Silber-Wolfram-Legierung ermöglicht es ihr, mechanischem Verschleiß an der Elektrodenoberfläche zu widerstehen, eine präzise Kontaktgeometrie aufrechtzuerhalten und die Stabilität und Konsistenz des Schweißprozesses zu gewährleisten. Ebenso ermöglicht die hohe Härte bei plasmagespritzten Teilen der Legierung, dem Aufprall und Abrieb durch

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



schnelle Partikelströme standzuhalten, die Lebensdauer der Teile zu verlängern und sich für Beschichtungsanwendungen in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Industrie zu eignen. Darüber hinaus erhöht die hohe Härte bei Gegengewichtskomponenten in der Luft- und Raumfahrt die Verschleißfestigkeit der Legierung unter Vibrationen und mechanischer Belastung und gewährleistet so die langfristige Zuverlässigkeit des dynamischen Ausgleichssystems.

Die Anwendungsvorteile einer hohen Härte zeigen sich auch in geringeren Wartungskosten und einer verbesserten Anlageneffizienz. Die Verschleißfestigkeit einer Silber-Wolfram-Legierung verringert die Häufigkeit des Komponentenaustauschs, insbesondere bei Kontakten von Hochspannungsleistungsschaltern und Relais. Häufiger mechanischer Kontakt und Lichtbogenbildung führen oft zu Oberflächenverlust. Eine hohe Härte verlangsamt diesen Verlust wirksam und verlängert die Betriebsdauer der Anlage. Eine Optimierung der Mikrostruktur der Legierung, beispielsweise die Beseitigung von Poren durch heißisostatisches Pressen (HIP) oder die Verbesserung der Partikelgleichmäßigkeit durch Wolframpulver im Nanomaßstab, erhöht die Verschleißfestigkeit zusätzlich. Diese Eigenschaft unterstützt die Langzeitstabilität der Legierung in Umgebungen mit hoher Verschleißbelastung und verringert Leistungseinbußen oder Sicherheitsrisiken durch Verschleiß. Zu den Optimierungsrichtungen gehören die Entwicklung von oberflächenhärtenden Beschichtungen (wie TiN oder CrN) zur weiteren Verbesserung der Verschleißfestigkeit oder die Erhöhung des Wolframgehalts im verschleißfesten Bereich durch ein funktionales Gradientendesign zur lokalen Leistungssteigerung.

Der Verschleißfestigkeitsvorteil einer hohen Härte bringt jedoch auch gewisse Herausforderungen mit sich. Ein hoher Wolframgehalt kann die Sprödigkeit der Legierung erhöhen, insbesondere bei unzureichender Silber-Flüssigphase. Dies erhöht das Risiko von Mikrorissen und beeinträchtigt die Verschleißfestigkeit. Präzise Steuerung und Nachbearbeitung des Sinterprozesses sind entscheidend, beispielsweise durch Funkenplasmasintern (SPS) zur schnellen Bildung einer dichten Struktur oder durch die Reduzierung von Spannungskonzentrationen durch Oberflächenpolitur. Zukünftig werden intelligente Überwachungstechnologien zur Echtzeit-Bewertung des Verschleißzustands oder die Erforschung selbstheilender Beschichtungen zur dynamischen Reparatur von Oberflächenschäden das Anwendungspotenzial von Silber-Wolfram-Legierungen im Verschleißfestigkeitsbereich weiter steigern.

### 2.3.1.3 Härtevergleich mit anderen Legierungen und Vorteile

Die hohe Härte der Silber-Wolfram-Legierung ist eng mit ihrer Leistungsfähigkeit in Umgebungen mit hohem Verschleiß und mechanischer Belastung verbunden. Ihre Vorteile werden durch einen Härtevergleich mit anderen gängigen Legierungen deutlich. Härte bezeichnet die Widerstandsfähigkeit eines Materials gegenüber Oberflächeneindrücken und Verschleiß. Die Härte der Silber-Wolfram-Legierung beruht hauptsächlich auf der hohen Eigenhärte des Wolframs und seiner dichten Mikrostruktur, die während des Sinterprozesses entsteht. Im Folgenden werden die Härtevorteile der Silber-Wolfram-Legierung und ihre herausragende Leistungsfähigkeit in verschiedenen Anwendungen mit Materialien wie Wolfram-Kupfer-Legierungen, reinem Silber und Hartmetall verglichen.

Erstens weist eine Silber-Wolfram-Legierung eine höhere Härte auf als eine Wolfram-Kupfer-Legierung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bei einer Wolfram-Kupfer-Legierung dient Wolfram als Matrix und Kupfer als Bindephase. Obwohl sie eine gute Wärmeleitfähigkeit und gute Verarbeitungseigenschaften aufweist, ist ihre Verschleißfestigkeit aufgrund der geringeren Härte des Kupfers begrenzt, weshalb sie sich eher für wärmeableitende Substrate als für stark beanspruchte Kontakte eignet. Eine Silber-Wolfram-Legierung hat einen höheren Wolframgehalt und bildet aufgrund der Benetzungswirkung des Silbers eine dichtere Struktur. Ihre Härte ist wesentlich besser als die einer Wolfram-Kupfer-Legierung. Insbesondere bei Widerstandsschweißelektroden und plasmagespritzten Teilen ist eine Silber-Wolfram-Legierung widerstandsfähiger gegen mechanische Abnutzung und Oberflächeneinwirkung. Zudem zeigt sich der Härtevorteil der Silber-Wolfram-Legierung auch in ihrer Stabilität in lichtbogenbeständigen Umgebungen. Durch den hohen Schmelzpunkt von Wolfram bleibt die Oberflächenintegrität bei Lichtbogenerosion erhalten, während die Kupferphase einer Wolfram-Kupfer-Legierung leicht schmilzt, was ihre Widerstandsfähigkeit gegen Lichtbogenverschleiß einschränkt.

Zweitens ist die Härte von Silber-Wolfram-Legierungen im Vergleich zu reinem Silber deutlich verbessert. Reines Silber wird aufgrund seiner hohen Leitfähigkeit und Duktilität häufig für elektrische Kontakte verwendet. Aufgrund seiner geringeren Härte verformt oder verschleißt es jedoch leicht bei mechanischer Abnutzung und Lichtbogenbildung, was seine Lebensdauer begrenzt. Durch die Zugabe von Wolframpartikeln mit hoher Härte wird die Verschleiß- und Verformungsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen deutlich verbessert. Dadurch eignet sie sich für Anwendungen mit häufigem Kontakt, wie z. B. Hochspannungs-Leistungsschalterkontakte und Relaiskontakte. Die Weichheit von reinem Silber erschwert die Aufnahme hoher Belastungen, während die hohe Härte von Silber-Wolfram-Legierungen die langfristige Zuverlässigkeit von Komponenten in dynamischen Umgebungen gewährleistet. Obwohl die Leitfähigkeit etwas geringer ist als die von reinem Silber, kann durch Optimierung des Silber-Wolfram-Verhältnisses ein Leistungsgleichgewicht erreicht werden.

Drittens: Verglichen mit Hartmetall (z. B. Wolfram-Kobalt-Legierungen) weisen Silber-Wolfram-Legierungen eine etwas geringere Härte auf, bieten aber eine bessere Gesamtleistung. Hartmetall besteht hauptsächlich aus Wolframkarbid und Kobalt und weist eine extrem hohe Härte auf. Es wird häufig für Schneidwerkzeuge und Formen verwendet, weist jedoch eine schlechte elektrische und thermische Leitfähigkeit auf, was seine Anwendung in elektrischen Kontakten einschränkt. Obwohl die Härte von Silber-Wolfram-Legierungen geringer ist als die von Hartmetall, eignen sie sich aufgrund ihrer hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit und Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit besser für elektrische Kontakte und Schweißelektroden. Durch die mikrostrukturelle Optimierung der Silber-Wolfram-Legierung (z. B. durch nanoskaliges Wolframpulver und Flüssigphasensintern) nähert sich ihre Härte dem von Hartmetall an, während die Leitfähigkeitseigenschaften von Silber erhalten bleiben. So wird eine effektive Kombination aus Härte und Leitfähigkeit erreicht.

Der Härtevorteil von Silber-Wolfram-Legierungen zeigt sich in der Vielfalt ihrer Anwendungsszenarien. In Widerstandsschweißelektroden verhindert die hohe Härte der Silber-Wolfram-Legierung Verschleiß beim Werkstückkontakt und sorgt so für eine stabile Schweißqualität. In plasmagespritzten Komponenten hält die hohe Härte dem Aufprall von Hochgeschwindigkeitspartikelströmen stand und verlängert die Lebensdauer. In Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt verbessert die hohe Härte die Haltbarkeit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

in Vibrationsumgebungen. Diese Vorteile machen sie anderen Legierungen überlegen, wenn sowohl Härte als auch Leitfähigkeit berücksichtigt werden müssen. Optimierungsansätze umfassen die Verbesserung des Gleichgewichts zwischen Härte und Zähigkeit durch Nanokompositstrukturen oder die Entwicklung von oberflächenhärtenden Beschichtungen zur weiteren Verbesserung der Verschleißfestigkeit. Der komparative Vorteil der hohen Härte der Silber-Wolfram-Legierung verschafft ihr eine einzigartige Position in den Bereichen Elektrotechnik, Elektronik und Verteidigung und leistet einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung hochzuverlässiger Komponenten. Ihr Potenzial kann zukünftig durch intelligente Fertigungstechnologien weiter ausgeschöpft werden.

### 2.3.2 Prinzip und Leistung der Lichtbogenerosionsbeständigkeit einer Silber-Wolfram-Legierung

Die Lichtbogenerosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen ist ihre Kerneigenschaft bei Hochstromkontakten. Sie ermöglicht es, Lichtbogenerosion und Materialverlust zu widerstehen und so die Lebensdauer der Komponenten zu verlängern. Lichtbogenerosionsbeständigkeit bezeichnet die Fähigkeit einer Legierung, Oberflächenschmelzen, Verdampfen und Oxidation unter Lichtbogeneinwirkung zu widerstehen. Dies steht in direktem Zusammenhang mit ihrer Zuverlässigkeit in Hochspannungsschaltern, Relais und Schweißelektroden. Die Lichtbogenerosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen profitiert vom hohen Schmelzpunkt und der chemischen Stabilität von Wolfram sowie der mikroskopischen Optimierung der Silber-Wolfram-Verbundstruktur.

Das Prinzip der Lichtbogenerosionsbeständigkeit basiert hauptsächlich auf den physikalischen und chemischen Eigenschaften von Wolfram. Wolfram hat einen extrem hohen Schmelzpunkt, wodurch es bei der hohen Lichtbogentemperatur nur schwer schmilzt oder verdampft. Die vom Lichtbogen erzeugte Wärme wird hauptsächlich von den Wolframpartikeln absorbiert und abgeleitet, wodurch der großflächige Oberflächenverlust reduziert wird. Silber als Bindephase benetzt die Wolframpartikel beim Flüssigphasensintern und bildet eine dichte Mikrostruktur, die die Riss- und Ablösebeständigkeit der Legierung erhöht. Beim Lichtbogen kann die Silberphase lokal schmelzen, doch die Skelettstruktur der Wolframpartikel bietet stabilen Halt, begrenzt den Verlust von geschmolzenem Silber und erhält die geometrische Integrität der Oberfläche. Die chemische Stabilität von Wolfram verringert zudem die Oxidations- und Korrosionsneigung in der Lichtbogenumgebung und reduziert so die durch den Lichtbogen verursachte Oberflächenschädigung. Die Optimierung des Sinterprozesses, beispielsweise durch Vakuum- oder Inertgasschutz, verhindert das Eindringen oxidativer Verunreinigungen und verbessert die Lichtbogenerosionsbeständigkeit zusätzlich.

Im Hinblick auf die Leistung in tatsächlichen Anwendungen ist die Lichtbogenerosionsbeständigkeit der Silber-Wolfram-Legierung besonders bei Hochspannungs-Leistungsschalterkontakten hervorzuheben. Hochspannungs-Leistungsschalter erzeugen beim Unterbrechen hoher Ströme starke Lichtbögen. Herkömmliche Materialien wie reines Silber oder Legierungen auf Kupferbasis neigen zu Ausfällen durch Schmelzen oder Ablation, was die Lebensdauer der Kontakte verkürzt. Silber-Wolfram-Legierungen verbessern ihre Lichtbogenbeständigkeit durch ihren hohen Wolframgehalt. Wolframpartikel bilden unter der Einwirkung des Lichtbogens eine Schutzschicht, die den Verlust der Silberphase reduziert und sicherstellt, dass die Kontakte auch bei häufigen Schaltvorgängen ihre stabile

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistung behalten. Bei Widerstandsschweißelektroden ermöglicht die Lichtbogenerosionsbeständigkeit der Silber-Wolfram-Legierung, dem Lichtbogeneinschlag beim Schweißen standzuhalten, die Ebenheit der Elektrodenoberfläche zu erhalten und die Qualität und Konsistenz des Schweißens sicherzustellen. Bei plasmagespritzten Komponenten unterstützt die Lichtbogenbeständigkeit der Legierung den Langzeitbetrieb in Hochtemperatur-Plasmaumgebungen, reduziert den Materialverlust an der Oberfläche und verlängert die Lebensdauer der Komponenten.

Die Lichtbogenerosionsbeständigkeit spiegelt sich auch in der Reduzierung von Sekundäreffekten durch Lichtbögen wider. Die mikrostrukturelle Optimierung von Silber-Wolfram-Legierungen (z. B. durch heißisostatisches Pressen zur Porenbeseitigung) verringert das Risiko konzentrierter Lichtbogenablation sowie die Entstehung von Mikrorissen und Schmelzspritzern. Die nichtmagnetischen Eigenschaften der Legierung verhindern den Einfluss elektromagnetischer Störungen auf die Lichtbogenstabilität und verbessern ihre Anwendbarkeit in elektromagnetisch sensiblen Umgebungen (wie MRT-Geräten oder Radarsystemen). Ein zu hoher Silbergehalt kann jedoch die Lichtbogenerosionsbeständigkeit verringern, da Silber einen niedrigen Schmelzpunkt hat und unter dem Lichtbogen leicht schmilzt. Diese Beständigkeit muss durch einen höheren Wolframanteil oder eine Oberflächenbeschichtung (z. B. ZrC) verbessert werden. Optimierungspotenziale umfassen die Entwicklung von nanoskaligem Wolframpulver zur Verbesserung der Oberflächengleichmäßigkeit oder den Einsatz intelligenter Überwachungstechnologie zur Echtzeit-Bewertung des Lichtbogenverluststatus. Kurz gesagt: Das Prinzip und die Leistung der Lichtbogenerosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen machen sie zu einer wichtigen Komponente in elektrischen Hochstromanwendungen und bieten eine solide Garantie für hochzuverlässige Komponenten. Zukünftige Forschung kann ihre Haltbarkeit weiter verbessern.

### 2.3.2.1 Mechanismus der Lichtbogenerosion

Der Mechanismus der Lichtbogenerosion bildet die Grundlage für das Verständnis der Lichtbogenbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen. Er beruht auf dem Einfluss der physikalischen und chemischen Prozesse des Lichtbogens auf die Materialoberfläche. Lichtbogenerosion tritt auf, wenn ein hoher Strom abgeschaltet oder geschlossen wird und sich der Lichtbogen im Kontaktpalt als Hochtemperaturplasma (üblicherweise über 6000 °C) bildet, was starke thermische Effekte und chemische Reaktionen hervorruft. Die thermische Wirkung des Lichtbogens führt zu lokalem Schmelzen, Verdampfen und Zerstäuben der Materialoberfläche. Das geschmolzene Metall wird durch den Lichtbogen schnell erhitzt und ausgestoßen, was zu Materialverlust führt. Die hohe Temperatur des Lichtbogens löst zudem Oxidationsreaktionen aus, insbesondere in Luftumgebung. Dabei verbindet sich die Metalloberfläche mit Sauerstoff zu Oxiden, was die Erosion zusätzlich beschleunigt. Die Energiekonzentration des Lichtbogens verursacht lokal hohe thermische Spannungen, die insbesondere bei unzureichender Materialhärte oder -dicke zu Mikrorissen oder Abplatzungen führen können.

Zu den spezifischen Mechanismen der Lichtbogenerosion zählen Wärmeleitung, Vergasung und elektrochemische Reaktionen. Durch Wärmeleitung wird die Lichtbogenenergie ins Innere des Materials übertragen, wodurch sich die Oberflächen- und darunterliegenden Schichten schnell erhitzen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Materialien mit niedrigem Schmelzpunkt (wie Silber) neigen dazu, innerhalb kurzer Zeit zu schmelzen. Der Vergasungsprozess führt dazu, dass das geschmolzene Metall bei hohen Temperaturen verdampft, insbesondere bei hohen Stromdichten. Dadurch steigt die Verdampfungsrate deutlich an, was zu Materialverlust führt. Im Lichtbogenplasma finden elektrochemische Reaktionen statt, bei denen sich das Metall mit Sauerstoff oder Stickstoff in der Umgebung verbindet und Oxide oder Nitride bildet, die an der Oberfläche haften oder sich ablösen können und so die Erosion weiter verstärken. Die kontinuierliche Einwirkung des Lichtbogens kann zudem zu thermischen Spannungskonzentrationen führen, insbesondere an der Grenzfläche heterogener Materialien oder bei mikroskopischen Defekten, was das Risiko der Rissausbreitung erhöht. Die Silberphase in der Silber-Wolfram-Legierung ist aufgrund ihres niedrigeren Schmelzpunkts (961 °C) anfällig für thermische Effekte, während die Wolframphase aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts (3422 °C) relativ stabil ist, ihre Grenzflächenbindungsqualität jedoch die allgemeine Korrosionsbeständigkeit direkt beeinflusst. Der Mechanismus der Lichtbogenerosion wird auch durch die komplexen Einflüsse der Einsatzbedingungen beeinflusst. In einer Hochdruckumgebung ist die Lichtbogenenergie höher und die Erosionsrate schneller; die Oxidation kann in einer Niederdruckumgebung aufgrund der geringeren Sauerstoffkonzentration verlangsamt sein, der thermische Effekt ist jedoch immer noch dominant. Die Lichtbogendauer und die Stromstärke beeinflussen ebenfalls den Erosionsgrad. Kurzzeitig hoher Strom kann zum sofortigen Schmelzen führen, und langfristig niedriger Strom kann zu langsamer Oxidation und Verschleiß führen. Die Mikrostruktur der Silber-Wolfram-Legierung (wie Porosität und Partikelverteilung) ist entscheidend für die Empfindlichkeit gegenüber Lichtbogenerosion. Porosität oder ungleichmäßige Verteilung können zu Konzentrationspunkten thermischer Spannungen werden und den Materialverlust beschleunigen. Das Verständnis dieser Mechanismen der Lichtbogenerosion bietet eine theoretische Grundlage für die Optimierung der Korrosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen. Ihre Haltbarkeit kann durch Anpassung des Zusammensetzungsverhältnisses und des Sinterprozesses wirksam verbessert werden.

### 2.3.2.2 Das intrinsische Prinzip der Silber-Wolfram-Legierung, die der Lichtbogenerosion widersteht

Die Widerstandsfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung gegen Lichtbogenerosion beruht auf ihrer einzigartigen Zusammensetzung und optimierten Mikrostruktur, kombiniert mit dem hohen Schmelzpunkt und der chemischen Stabilität von Wolfram sowie der Benetzungs- und Verdichtungswirkung von Silber. Der Schlüssel zur Widerstandsfähigkeit gegen Lichtbogenerosion liegt in der Reduzierung von Schmelzen, Verdampfen und Oxidation von Materialien im Hochtemperaturplasma. Die Silber-Wolfram-Legierung erreicht dieses Ziel durch die folgenden Mechanismen. Erstens ist der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (3422 °C) der Hauptfaktor für die Widerstandsfähigkeit gegen Lichtbogenerosion. Unter der hohen Temperatur des Lichtbogens bleiben Wolframpartikel fest, absorbieren und verteilen Wärme und begrenzen den Oberflächenschmelzbereich. Die chemische Stabilität von Wolfram verringert die Oxidationsneigung zusätzlich und verhindert eine Reaktion mit Sauerstoff oder Stickstoff im Lichtbogenplasma, wodurch die Oxidbildung reduziert wird. Silber schmilzt als Bindephase beim Flüssigphasensintern (961 °C), benetzt Wolframpartikel und füllt mikroskopische Lücken, um eine dichte Mikrostruktur zu bilden. Diese Struktur verbessert die Riss- und Ablösefestigkeit der Legierung und verhindert Schäden durch thermische Lichtbogenanspannung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die mikrostrukturelle Gestaltung der Silber-Wolfram-Legierung spielt eine wichtige Rolle bei der Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion. Während des Sinterprozesses dringt die flüssige Silberphase in die Oberfläche der Wolframpartikel ein, wodurch die Grenzflächenbindung zwischen den Partikeln erhöht und die Ausbreitung von Mikrorissen unter Lichtbogeneinwirkung reduziert wird. Die gleichmäßige Verteilung der Wolframpartikel bildet eine schützende Skelettstruktur, die die Lichtbogenenergie verteilt und das Risiko von lokalem Schmelzen oder Verdampfen reduziert. Das Heißisostatische Pressen (HIP) oder Funkenplasmasintern (SPS) optimiert die Mikrostruktur zusätzlich, beseitigt Restporen, verdichtet Korngrenzen und macht die Legierungsoberfläche korrosionsbeständiger. Die Silberphase kann unter Lichtbogeneinwirkung lokal schmelzen, doch die Unterstützung des Wolframskeletts begrenzt den Verlust von geschmolzenem Silber und erhält die geometrische Integrität der Oberfläche. Dieser synergistische Effekt verleiht der Silber-Wolfram-Legierung eine ausgezeichnete Lichtbogenbeständigkeit beim Abschalten oder Schließen hoher Ströme.

Das Zusammensetzungsverhältnis der Legierung hat zudem direkten Einfluss auf das inhärente Prinzip der Lichtbogenerosionsbeständigkeit. Ein hoher Wolframgehalt erhöht die Schmelz- und Oxidationsbeständigkeit der Legierung und eignet sich daher für Anwendungen mit hoher Lichtbogenintensität, wie beispielsweise Hochspannungsschalterkontakte. Bei einem moderaten Silbergehalt reicht die flüssige Phase aus, um die Wolframpartikel zu benetzen und so die Dichte zu gewährleisten. Ein zu hoher Silbergehalt kann jedoch die Korrosionsbeständigkeit verringern, da Silber aufgrund seines niedrigen Schmelzpunkts unter dem Lichtbogen leicht schmilzt. Die Kontrolle der Sinteratmosphäre (z. B. Vakuum oder hochreines Argon) verhindert das Eindringen oxidativer Verunreinigungen, erhält die Reinheit von Wolfram und Silber und erhöht die Korrosionsbeständigkeit zusätzlich. Oberflächenbehandlungstechnologien, wie beispielsweise Antioxidationsbeschichtungen durch plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD), unterstützen ebenfalls die Umsetzung des inhärenten Prinzips und reduzieren Sekundärschäden durch den Lichtbogen.

Das inhärente Prinzip der Lichtbogenerosionsbeständigkeit der Silber-Wolfram-Legierung ermöglicht ihre gute Leistung in praktischen Anwendungen. Bei Hochspannungsschalterkontakten verlängert die Lichtbogenbeständigkeit der Legierung die Lebensdauer des Schalters; bei Widerstandsschweißelektroden erhält die Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion die Ebenheit der Elektrodenoberfläche; und bei plasmagespritzten Komponenten unterstützt die Korrosionsbeständigkeit der Legierung den Langzeitbetrieb in Hochtemperatur-Plasmaumgebungen. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Oberflächengleichmäßigkeit durch nanoskaliges Wolframpulver oder die Entwicklung selbstheilender Beschichtungen zur dynamischen Reparatur von Lichtbogenschäden. Kurz gesagt: Die Silber-Wolfram-Legierung erreicht durch den hohen Schmelzpunkt von Wolfram, den Verdichtungseffekt von Silber und die Optimierung der Mikrostruktur eine effiziente Lichtbogenerosionsbeständigkeit und bietet so eine solide Grundlage für hochzuverlässige elektrische Anwendungen.

### 2.3.2.3 Unterschiede in der Lichtbogenerosionsbeständigkeit in verschiedenen Einsatzumgebungen

Die Lichtbogenerosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen variiert je nach

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Einsatzumgebung erheblich und wird von Faktoren wie Umgebungsbedingungen, Stromeigenschaften und Einsatzhäufigkeit beeinflusst. Die Bewertung der Lichtbogenerosionsbeständigkeit muss mit spezifischen Anwendungsszenarien wie Hochspannungsschaltern, Schweißelektroden und Luft- und Raumfahrtkomponenten kombiniert werden, um den Erosionseffekt der Umgebung auf die Legierungsoberfläche und die Leistungsunterschiede zu analysieren. Diese Unterschiede bilden eine wichtige Grundlage für die Optimierung von Legierungsdesign und -auswahl.

In Hochspannungs-Leistungsschalterkontakten ist die Lichtbogenerosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen in Hochstrom- und Hochspannungsumgebungen hervorragend. Schaltet der Leistungsschalter einen hohen Strom (üblicherweise Tausende von Ampere) ab, entsteht ein starker Lichtbogen mit Temperaturen von bis zu 6000 °C und mehr. Der hohe Wolframgehalt der Silber-Wolfram-Legierung macht sie beständig gegen Schmelzen und Verdampfen. Die Wolframpartikel absorbieren Wärme und verteilen die Lichtbogenenergie, wodurch der Oberflächenverlust reduziert wird. Luftsauerstoff kann jedoch eine leichte Oxidation der Silberphase verursachen, und Langzeitbetrieb kann die Oberflächenrauigkeit erhöhen und die Leitfähigkeit beeinträchtigen. Eine Vakuum- oder Inertgasumgebung (z. B. bei SF<sub>6</sub>-Leistungsschaltern) kann die Lichtbogenerosionsbeständigkeit deutlich verbessern, Oxidation und Sputtern reduzieren und die Lebensdauer der Kontakte verlängern.

Bei Widerstandsschweißelektroden weist die Silber-Wolfram-Legierung eine gute Lichtbogenerosionsbeständigkeit in Umgebungen mit kurzzeitigen Hochstromimpulsen auf. Der Schweißprozess ist mit hohen Stromdichten (zehntausende Ampere pro Quadratmillimeter) und lokal hohen Temperaturen verbunden, mit kurzer Lichtbogenlaufzeit, aber konzentrierter Energie. Die Wolfram-Skelettstruktur der Silber-Wolfram-Legierung verhindert ein sofortiges Schmelzen, und die Benetzungswirkung der Silberphase erhält die Oberflächendichte, wodurch die Elektrode auch bei mehreren Schweißzyklen ihre Formstabilität behält. Metaldämpfe oder Schweißschlacke in der Schweißumgebung können jedoch an der Oberfläche haften bleiben und das Erosionsrisiko erhöhen. Um die Leistung aufrechtzuerhalten, ist eine regelmäßige Reinigung oder eine Antihaftbeschichtung erforderlich. Beim Hochtemperaturschweißen kann die Schmelzpunktbegrenzung von Silber zu lokaler Erweichung führen, und die Hitzebeständigkeit muss durch eine Erhöhung des Wolframanteils optimiert werden.

In Luft- und Raumfahrtkomponenten wie Plasmaspritzelektroden weist die Silber-Wolfram-Legierung eine gute Lichtbogenerosionsbeständigkeit in kontinuierlichen Hochtemperaturplasmaumgebungen auf. Beim Plasmaspritzen kommt es zu einem schnellen Ionenfluss und Lichtbogenbildung. Die hohe Härte und der hohe Schmelzpunkt der Wolframphase der Legierung ermöglichen eine langfristige Beständigkeit gegen Thermoschocks und Oberflächenabrieb. Die hohe chemische Stabilität von Wolfram reduziert Oxidationsverluste, und die Wärmeleitfähigkeit von Silber trägt zur Wärmeableitung bei. Bei längerer Einwirkung von Sauerstoff oder korrosiven Gasen kann sich jedoch eine dünne Oxidschicht auf der Wolframoberfläche bilden, was die Erosionsbeständigkeit leicht verringert. Optimierte Sinterprozesse und Oberflächenbeschichtungen (wie ZrC) können die Leistung in extremen Umgebungen deutlich verbessern. Umweltfaktoren wie Feuchtigkeit, Salznebel und chemische Reinigungsmittel beeinflussen ebenfalls die Lichtbogenerosionsbeständigkeit. In feuchter Umgebung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

kann die Silberphase leicht korrodieren, was das Risiko einer lichtbogeninduzierten Oxidation erhöht. In maritimen oder industriellen Umgebungen kann Salznebel die Oberflächenzersetzung beschleunigen, sodass korrosionsbeständige Beschichtungen (wie TiN) zum besseren Schutz erforderlich sind. In Niederdruck- oder Vakuumumgebungen ist der Oxidationseffekt abgeschwächt und die Lichtbogenerosionsbeständigkeit verbessert. Der thermische Effekt ist jedoch weiterhin dominant, und die thermische Spannungskonzentration muss berücksichtigt werden. Auch die Nutzungshäufigkeit und die Stromstärke spielen eine wichtige Rolle. Hochfrequentes Schalten kann die Korrosion beschleunigen, und niedriger Strom kann eine langsame Oxidation verursachen. Das Silber-Wolfram-Verhältnis muss an die jeweilige Situation angepasst werden.

Die unterschiedliche Erosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen in verschiedenen Einsatzumgebungen dient als Orientierung für die Materialentwicklung. Optimierungsansätze umfassen die Entwicklung umweltverträglicher Beschichtungen oder die Echtzeit-Bewertung des Erosionszustands durch intelligente Überwachungstechnologie.

#### 2.3.2.4 Möglichkeiten zur Verbesserung der Lichtbogenerosionsbeständigkeit

Die Verbesserung der Lichtbogenerosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen ist der Schlüssel zu ihrer langfristigen Zuverlässigkeit in elektrischen Hochstromanwendungen. Dies muss durch eine Kombination aus Materialdesign, optimiertem Herstellungsprozess und Oberflächenbehandlung erreicht werden. Die Verbesserung der Lichtbogenerosionsbeständigkeit zielt hauptsächlich auf Probleme wie Lichtbogenschmelzen bei hohen Temperaturen, Oxidation und thermische Spannungskonzentration ab. Sie kombiniert den hohen Schmelzpunkt von Wolfram mit den Leitfähigkeitsvorteilen von Silber, um die Mikrostruktur und die Einsatzumgebung zu optimieren. Im Folgenden werden konkrete Verbesserungsmöglichkeiten beschrieben.

Die Optimierung des Zusammensetzungsverhältnisses ist die Grundlage für eine verbesserte Lichtbogenerosionsbeständigkeit. Eine Erhöhung des Wolframgehalts kann die Schmelz- und Oxidationsbeständigkeit der Legierung deutlich verbessern, da der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (3422 °C) die Legierung bei hohen Lichtbögentemperaturen stabil hält und den Oberflächenverlust reduziert. Studien haben gezeigt, dass die Lichtbogenerosionsbeständigkeit der Legierung bei einem Wolframgehalt von 60–80 % optimal ausgewogen ist, wobei die Schutzwirkung von Wolfram und die Leitfähigkeit von Silber berücksichtigt werden. Spuren von Additiven wie Nickel oder Kobalt (0,5–2 %) können den Flüssigphasensintereffekt verbessern, die Grenzflächenbindung zwischen Wolframpartikeln verstärken und das Risiko lichtbogeninduzierter Mikrorisse verringern. Additive müssen jedoch streng kontrolliert werden, um die nichtmagnetischen Eigenschaften nicht zu beeinträchtigen.

Zweitens kann die Optimierung des Sinterprozesses die Dichte der Mikrostruktur deutlich verbessern. Flüssigphasensintern füllt die Lücken zwischen den Wolframpartikeln durch die Benetzungswirkung von Silber, reduziert die Porosität und verbessert die Abriebfestigkeit. Die Funkenplasmasintertechnologie (SPS) bildet durch gepulsten Strom und Hochspannung schnell eine dichte Struktur, verkürzt die Sinterzeit, verhindert übermäßiges Kornwachstum und verbessert die Oberflächengleichmäßigkeit.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Heißisostatisches Pressen (HIP) eliminiert Restdefekte durch omnidirektionalen Hochdruck, verbessert die Dichte weiter und reduziert Lichtbogenenergiekonzentrationspunkte. Eine Vakuum- oder hochreine Argon-Sinterumgebung kann die Einführung oxidiert Verunreinigungen verhindern, die Reinheit von Wolfram und Silber erhalten und lichtbogeninduzierte Oxidationsverluste reduzieren.

Drittens ist die Oberflächenbehandlung ein wirksames Mittel zur Verbesserung der Lichtbogenerosionsbeständigkeit. Antioxidationsbeschichtungen, die mittels plasmaunterstützter chemischer Gasphasenabscheidung (PECVD) aufgebracht werden, wie beispielsweise Titannitrid (TiN) oder Zirkoniumcarbid (ZrC), bilden eine dichte Schutzschicht auf der Legierungsoberfläche, isolieren Sauerstoff und Lichtbogenplasma und reduzieren so Schmelzen und Oxidation. Elektrochemisches Polieren kann die Oberflächengüte optimieren und den anfänglichen Punkt konzentrierter Lichtbogenablation reduzieren. Oberflächenhärtende Beschichtungen können zudem die Verschleißfestigkeit erhöhen und die Kontaktlebensdauer verlängern. Studien haben gezeigt, dass TiN-Beschichtungen die Lichtbogenerosionsrate um etwa 30–40 % reduzieren und so die Leistung deutlich verbessern können.

Viertens können Umweltmanagement und die Optimierung der Einsatzbedingungen die Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion weiter verbessern. In Hochspannungsschaltern wird SF<sub>6</sub> oder Inertgas als Lichtbogenlöschmittel eingesetzt, um Sauerstoffkonzentration und Oxidationsreaktionen zu reduzieren. Bei Schweißelektroden kann die Steuerung von Schweißparametern wie Stromimpulsbreite und -frequenz die Lichtbogendauer verkürzen und thermische Effekte reduzieren. Intelligente Überwachungstechnologie erkennt Lichtbogenverlust und Temperaturänderungen in Echtzeit durch eingebettete Sensoren, optimiert Wartungszyklen und verhindert übermäßige Erosion. Das Design von funktionell abgestuften Materialien (FGM) erhöht den Wolframgehalt an der Oberfläche, um die Schmelzbeständigkeit zu verbessern und gleichzeitig die Leitfähigkeit der inneren Silberphase zu erhalten.

Die kombinierte Anwendung dieser Ansätze ermöglicht die Verwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in Hochspannungsschalterkontakten, Widerstandsschweißelektroden und plasmagespritzten Komponenten, wodurch die Lebensdauer der Komponenten verlängert und die Zuverlässigkeit verbessert wird. Optimierungspotenziale umfassen die Entwicklung selbstreparierender Beschichtungen zur dynamischen Reparatur von Lichtbogenschäden oder die Verbesserung der Oberflächengleichmäßigkeit durch nanoskalige Wolframpulver.

### 2.3.3 Antihalt- und Antischweißigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung

Die Antihalt- und Antischmelzschweißigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung sind wichtige Eigenschaften bei elektrischen Kontakten und Schweißelektroden. Sie ermöglichen es, der Haftung und Verschmelzung mit dem Werkstück oder der Kontaktfläche zu widerstehen und so die Unabhängigkeit und Funktionsstabilität der Komponenten zu erhalten. Antihalt bezeichnet die Fähigkeit der Legierung, das Aneinanderhaften von Materialien bei mechanischem Kontakt oder Lichtbogeneinwirkung zu verhindern, während Antischmelzschweißen die Fähigkeit bezeichnet, das Verschmelzen mit dem

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Werkstück unter Hochtemperaturschweiß- oder Lichtbogenbedingungen zu verhindern. Diese Eigenschaften wirken sich direkt auf die Kontaktschaltleistung, die Schweißqualität und die Lebensdauer der Geräte aus. Die Silber-Wolfram-Legierung erzielt ihre hervorragende Leistung durch die hohe Härte von Wolfram und die optimierte Benetzung von Silber.

### 2.3.3.1 Ursachen für Adhäsion und Verschweißung

Adhäsions- und Schweißphänomene sind die größten Herausforderungen für Silber-Wolfram-Legierungen bei Hochstrom- oder Hochtemperaturanwendungen. Die Ursachen für Adhäsion und Schweißen hängen mit den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Materials, den Kontaktbedingungen und Umweltfaktoren zusammen. Adhäsion bezeichnet die Oberflächenhaftung des Kontakts oder der Elektrode am Werkstück oder am Werkstoff unter mechanischem Kontakt oder Lichtbogeneinwirkung. Schweißen hingegen bezeichnet die teilweise Verschmelzung von Material und Werkstück bei hohen Temperaturen zu einer irreversiblen Verbindung. Das Auftreten dieser Phänomene verringert unmittelbar die Schaltleistung und Lebensdauer der Komponenten, weshalb ihre Ursachen eingehend analysiert werden müssen.

Die Hauptursachen für Adhäsion sind mikroskopische Kaltverschweißungen und Reibungswärmeeffekte zwischen Kontaktflächen. Bei Kontakten von Hochspannungs-Leistungsschaltern oder Relaiskontakten kommt die Silber-Wolfram-Legierung unter hohem Druck mit dem Doppelmaterial in Kontakt. Durch die mechanische Kraft werden die Mikrounebenheiten auf der Oberfläche plastisch verformt, wodurch sich der Abstand zwischen den Metallatomen zum Gitteranpassungsbereich verkürzt und ein Kaltverschweißungseffekt entsteht. Unter Einwirkung des Lichtbogens schmilzt die lokal hohe Temperatur (über 6000 °C) die Silberphase, verbessert die Fließfähigkeit und haftet an der Oberfläche des Doppelmaterials. Besonders bei hohem Silbergehalt steigt das Adhäsionsrisiko. Der Reibungswärmeeffekt verstärkt die Adhäsion bei dynamischem Kontakt weiter, besonders beim Schalten mit hoher Frequenz oder beim Gleiten bei niedriger Geschwindigkeit, wo Wärmestau die atomare Diffusion an der Oberfläche fördert.

Das Auftreten von Schmelzschweißen hängt eng mit Hochtemperaturschweißen oder Lichtbogenbedingungen zusammen. Bei Widerstandsschweißelektroden oder plasmagespritzten Teilen führt eine hohe Stromdichte zu lokalem Schmelzen, wodurch die Oberfläche der Silber-Wolfram-Legierung und das Werkstückmaterial (z. B. Stahl oder Aluminium) bei hohen Temperaturen ein Schmelzbad bilden. Der niedrige Schmelzpunkt von Silber erleichtert das Schmelzen. Nach dem Mischen mit dem Werkstückmetall kühlt es ab und erstarrt zu einer Schmelzschweißnaht. Obwohl der hohe Schmelzpunkt von Wolfram einen gewissen Widerstand bietet, können thermische Spannungen oder Verunreinigungen (z. B. Oxide) an der Grenzfläche das Schmelzen fördern. Auch die chemische Aktivität des Lichtbogenplasmas spielt eine Rolle. Sauerstoff oder Stickstoff reagieren mit dem geschmolzenen Metall zu Verbindungen, erhöhen die Viskosität und fördern das Schmelzschweißen.

Der Einfluss von Umweltfaktoren auf Adhäsions- und Schweißphänomene ist nicht zu vernachlässigen. In feuchter oder schwefelhaltiger Umgebung kann die Silberphase Sulfide oder Oxide bilden, die die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Antihafteigenschaften der Oberfläche verringern und das Adhäsionsrisiko erhöhen. In einer heißen oder sauerstoffreichen Umgebung reagiert geschmolzenes Silber mit dem Oxid des Werkstücks und verstärkt so die Schweißneigung. Anpressdruck, Stromstärke und Schaltfrequenz spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Hochspannungs- oder Hochfrequenzbetrieb verstärkt thermische Effekte und atomare Diffusion und beschleunigt so das Auftreten von Adhäsion und Schweißung. Mikrostrukturelle Defekte wie Poren oder ungleichmäßige Verteilung können zu Spannungskonzentrationen führen und diese Phänomene zusätzlich fördern.

Die Ursachen von Adhäsion und Verschweißung geben Hinweise zur Optimierung von Silber-Wolfram-Legierungen. Traditionelle Werkstoffe wie reines Silber neigen aufgrund ihrer hohen Duktilität zur Adhäsion, und kupferbasierte Legierungen neigen aufgrund ihres niedrigen Schmelzpunkts zur Verschweißung. Silber-Wolfram-Legierungen versuchen, diese Probleme durch Optimierung der Wolframhärte und des Silberanteils zu überwinden. Optimierungsansätze umfassen die Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses, die Verbesserung der Oberflächenbehandlung und die Kontrolle der Einsatzbedingungen, um das Risiko von Adhäsion und Verschweißung zu reduzieren. Das Verständnis dieser Mechanismen hilft bei der Entwicklung von Silber-Wolfram-Legierungen mit besserer Adhäsions- und Verschweißbeständigkeit und bietet so eine zuverlässige Unterstützung für die Anwendung von elektrischen Kontakten und Schweißelektroden.

### 2.3.3.2 Antihafteigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung

Die Antihafteigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung sind hervorragend für Anwendungen im Bereich elektrischer Kontakte und Schweißelektroden geeignet. Sie verhindern effektiv die Oberflächenhaftung am Werkstück oder am Gegenmaterial und gewährleisten so die Unabhängigkeit und Schaltstabilität der Komponenten. Antihafteigenschaften bezeichnen die Fähigkeit der Legierung, das Aneinanderhaften von Materialien bei mechanischem Kontakt oder Lichtbogeneinwirkung zu verhindern, was sich direkt auf das Öffnungs- und Schließverhalten sowie die Lebensdauer des Kontakts auswirkt. Silber-Wolfram-Legierungen weisen dank der hohen Härte von Wolfram, der optimierten Benetzung von Silber und dem synergistischen Effekt der Mikrostruktur hervorragende Antihafteigenschaften auf, insbesondere bei Hochspannungsschaltern, Relais und Widerstandsschweißelektroden.

Bei Hochspannungs-Leistungsschalterkontakten zeigt sich die Antihafteigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung besonders beim Trennen oder Schließen hoher Ströme. Wenn die Kontakte hohe Ströme (üblicherweise Tausende von Ampere) unterbrechen, entstehen Lichtbögen, und hohe Temperaturen (über 6000 °C) können dazu führen, dass herkömmliche Materialien wie reines Silber oder kupferbasierte Legierungen am Doppelmateriale haften bleiben, was die Schaltzuverlässigkeit beeinträchtigt. Der hohe Wolframgehalt (60–80 %) der Silber-Wolfram-Legierung sorgt für eine harte Skelettstruktur, die Oberflächenverformungen und Kaltverschweißungen widersteht. Gleichzeitig bildet die entsprechende Benetzungswirkung der Silberphase eine dichte Schnittstelle, die die anfängliche Haftstelle reduziert. Tatsächliche Tests zeigen, dass die Hafrate von Kontakten aus Silber-Wolfram-Legierung nach Millionen von Schaltzyklen unter 5 % liegt. Dies ist deutlich besser als die 20–30 % von Kontakten aus reinem Silber und verlängert die Lebensdauer der Geräte erheblich.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bei Widerstandsschweißelektroden überzeugen die Antihafteigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung durch häufigen Kontakt mit Werkstücken (wie Stahl oder Aluminium). Beim Schweißen können hohe Stromdichten und lokal hohe Temperaturen dazu führen, dass die Elektrode am Werkstück haftet. Herkömmliche Materialien wie Kupferlegierungen neigen aufgrund der Anhaftung von geschmolzenem Metall zum Versagen. Die Wolframpartikel der Silber-Wolfram-Legierung bilden eine Schutzschicht auf der Oberfläche. Die Härte (üblicherweise bis zu 200–300 HV) verhindert das Anhaften von Werkstückmaterialien. Die Wärmeleitfähigkeit von Silber leitet Wärme schnell ab und reduziert das Risiko des Anhaftens. In der Praxis beträgt die Oberflächenhaftungsfläche von Silber-Wolfram-Elektroden nach Tausenden von Schweißvorgängen weniger als 1 %, wodurch die Stabilität der Elektrodenform und die Schweißqualität erhalten bleiben.

Bei plasmagespritzten Teilen unterstützen die Antihafteigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung die Trennung zwischen Hochgeschwindigkeits-Ionenstrom und Werkstück. Während des Spritzvorgangs können hohe Lichtbogentemperaturen und Partikeleinwirkung Materialhaftung verursachen und die Gleichmäßigkeit der Beschichtung beeinträchtigen. Die hohe Härte und der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient der Silber-Wolfram-Legierung ( $\text{ca. } 4,5\text{--}6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) verringern die durch thermische Spannung verursachte Haftung. Die chemische Stabilität von Wolfram verringert zudem die Möglichkeit einer Reaktion mit dem Werkstück. Experimentelle Daten zeigen, dass die Haftung von Sprühelektroden aus Silber-Wolfram-Legierungen nach längerem Betrieb im Vergleich zu kupferbasierten Materialien um etwa 50 % reduziert ist, was die Zuverlässigkeit des Beschichtungsprozesses gewährleistet.

Die hervorragende Antihaftwirkung profitiert auch von der Optimierung der Mikrostruktur. Sinterverfahren wie Heißisostatisches Pressen (HIP) beseitigen Porosität, und Funkenplasmasintern (SPS) verbessert die Partikelgleichmäßigkeit, reduziert Spannungskonzentrationen und verringert die Wahrscheinlichkeit von Adhäsion. Oberflächenbehandlungen wie elektrochemisches Polieren oder Antihafbeschichtungen (z. B. DLC) verbessern die Antihaftwirkung zusätzlich, insbesondere in feuchten oder schwefelhaltigen Umgebungen. Die Beschichtung isoliert die Reaktion zwischen der Silberphase und der Umgebung und hält die Oberfläche sauber. Ein zu hoher Silbergehalt kann jedoch das Adhäsionsrisiko erhöhen, was durch eine Erhöhung des Wolframanteils oder eine optimierte Oberflächenbehandlung ausgeglichen werden muss. Optimierungsansätze umfassen die Entwicklung von nanoskaligem Wolframpulver zur Erhöhung der Oberflächenhärte oder die Integration intelligenter Überwachungstechnologie zur Echtzeit-Bewertung des Adhäsionsstatus. Kurz gesagt: Die Antihaftwirkung der Silber-Wolfram-Legierung unterstützt ihren Einsatz in Hochfrequenzschalt- und Schweißanwendungen und verbessert die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Komponenten deutlich.

### 2.3.3.3 Analyse der Faktoren, die die Antihaft- und Antischweiß Eigenschaften beeinflussen

Die Antihaft- und Antischweiß Eigenschaften von Silber-Wolfram-Legierungen werden von vielen Faktoren beeinflusst, darunter Materialeigenschaften, Herstellungsverfahren, Einsatzbedingungen und Umgebungsparameter, die ihre Leistung in elektrischen Kontakten und Schweißelektroden direkt bestimmen. Die Analyse dieser Einflussfaktoren trägt dazu bei, das Legierungsdesign zu optimieren und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



ihre Zuverlässigkeit in Umgebungen mit hohen Strömen und hohem Verschleiß zu verbessern.

Erstens ist das Zusammensetzungsverhältnis der Hauptfaktor, der die Fähigkeit zum Widerstehen von Adhäsion und Schweißen beeinflusst. Je höher der Wolframgehalt, desto härter und widerstandsfähiger gegenüber hohen Temperaturen ist die Legierung und desto besser ist die Fähigkeit zum Widerstehen von Adhäsion und Schweißen, da der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (3422 °C) das Risiko von Oberflächenschmelzen verringert und die Härte (200–300 HV) Kaltschweißen und Einbetten in Werkstücke verhindert. Bei einem mittleren Silbergehalt bildet Flüssigphasensintern eine dichte Struktur und verbessert die Grenzflächenbindung. Ein zu hoher Silbergehalt (mehr als 50 %) kann jedoch aufgrund des niedrigeren Schmelzpunkts (961 °C) die Neigung zum Verkleben und Schweißen erhöhen, insbesondere bei hohen Lichtbogentemperaturen. Spurenzusätze wie Nickel (0,5–2 %) können die Zähigkeit und Benetzungswirkung verbessern, zu hohe Mengen können jedoch Magnetismus verursachen oder die Korrosionsbeständigkeit verringern und erfordern eine genaue Kontrolle.

Zweitens hat die Mikrostruktur einen erheblichen Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit gegen Adhäsion und Schweißen. Die Dichte ist entscheidend, und eine hohe Porosität (z. B. über 5 %) kann zu Spannungskonzentrationen führen und das Risiko von Adhäsion oder Schweißen erhöhen. Sinterverfahren wie Heißisostatisches Pressen (HIP) oder Funkenplasmasintern (SPS) verbessern die Dichte durch Beseitigung von Poren und reduzieren Oberflächendefekte unter thermischer Einwirkung. Die gleichmäßige Verteilung und Partikelgrößenoptimierung der Wolframpartikel (Nano- oder Submikrometergröße) erhöhen die Verformungsbeständigkeit der Skelettstruktur und verringern die Neigung zum Kaltschweißen. Die durch die Korngrenzen verstärkte Silberphasenschicht puffert die thermische Spannung, doch die ungleichmäßige Verteilung kann zu lokalem Schmelzen führen, und um die Gleichmäßigkeit des Mischpulvers zu gewährleisten, ist ein Hochenergie-Kugelmahlen erforderlich.

Drittens wirken sich die Oberflächeneigenschaften direkt auf die Antihaft- und Antischweißeigenschaften aus. Eine hohe Oberflächenrauheit vergrößert die Kontaktfläche, was leicht zu Kaltverschweißungen oder zum Anhaften geschmolzenen Metalls führen kann. Elektrochemisches oder mechanisches Polieren kann die Rauheit verringern und die Anzahl der anfänglichen Haftpunkte reduzieren. Antihaftbeschichtungen wie Titanitrid (TiN) oder diamantähnliche Beschichtungen (DLC) bilden eine Schutzschicht, die die Silberphase vor einer Reaktion mit dem Werkstück schützt und das Risiko von Schweißungen verringert. Oberflächenoxidation oder -sulfidierung (z. B. in schwefelhaltiger Umgebung) kann die Viskosität erhöhen, und die Oberflächenreinheit muss durch Vakuumsintern oder inerte Atmosphäre kontrolliert werden.

Viertens sind die Kontaktbedingungen entscheidende Faktoren für die Leistung. Hoher Kontaktdruck verstärkt die plastische Verformung und erhöht das Risiko von Kaltverschweißungen. Das Kontaktdesign muss daher optimiert werden, um Überspannungen zu reduzieren. Stromstärke und Schaltfrequenz spielen ebenfalls eine Rolle. Hohe Ströme (z. B. Tausende von Ampere) oder Hochfrequenzbetrieb (mehrmals pro Sekunde) verstärken thermische Effekte und atomare Diffusion und beschleunigen so das Anhaften und Verschweißen. Kurzzeitige Impulsströme (z. B. beim Schweißen) können den Schmelzbereich verringern, die Parameter müssen jedoch präzise kontrolliert werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fünftens haben Umweltfaktoren einen erheblichen Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit gegen Adhäsion und Schweißen. Eine feuchte oder schwefelhaltige Umgebung (z. B. eine Industriatmosphäre) kann zur Sulfidierung oder Oxidation der Silberphase führen, die Viskosität erhöhen und eine abgedichtete Konstruktion oder eine Korrosionsschutzbeschichtung erfordern. Eine Umgebung mit hohen Temperaturen (z. B. über 300 °C) verstärkt die Schmelzneigung und erfordert eine Erhöhung des Wolframanteils oder den Einsatz eines Inertgasschutzes. Hohe Sauerstoffkonzentrationen (z. B. 21 % in der Luft) fördern das Oxidationsschweißen, und eine Vakuum- oder SF<sub>6</sub>-Umgebung kann die Korrosion deutlich reduzieren. Salzsprühnebel oder chemische Reinigungsmittel können die Oberfläche korrodieren und die Antihafteigenschaft beeinträchtigen, sodass regelmäßige Wartung oder Oberflächenpassivierung erforderlich ist.

Der kombinierte Einfluss dieser Faktoren gibt Hinweise zur Optimierung von Silber-Wolfram-Legierungen. Optimierungsstrategien umfassen die Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses (60–80 % Wolfram), die Optimierung des Sinterprozesses (z. B. HIP), das Aufbringen von Antihafbeschichtungen (z. B. DLC) und die Kontrolle der Einsatzbedingungen (z. B. sauerstoffarme Umgebung). Zukünftig werden intelligente Überwachungstechnologien zur Echtzeit-Bewertung des Haft- und Schweißstatus oder die Entwicklung adaptiver Beschichtungen zur dynamischen Leistungsanpassung die Antihaf- und Schweißeigenschaften von Silber-Wolfram-Legierungen weiter verbessern und hochzuverlässige Anwendungen ermöglichen.

#### 2.3.4 Prinzip und Anwendung der hervorragenden Leitfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen

Die hervorragende Leitfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen ermöglicht ihre breite Anwendung in elektrischen Geräten. Sie ermöglicht eine effiziente Stromübertragung und erfüllt die Anforderungen an Hochleistungskontakte und -elektroden. Leitfähigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Materials, Ladung zu übertragen. Silber-Wolfram-Legierungen erreichen durch die hohe Leitfähigkeit des Silbers und die strukturelle Unterstützung durch Wolfram eine hervorragende Stromübertragungsleistung. Diese Eigenschaft hängt nicht nur von den inhärenten Eigenschaften des Materials ab, sondern ist auch eng mit der Optimierung des Zusammensetzungsverhältnisses und der Mikrostruktur verbunden. Dadurch wird eine zuverlässige Unterstützung für Anwendungen wie Hochspannungsschalter, Relais und Schweißelektroden gewährleistet. Im Folgenden werden die physikalischen Eigenschaften der Leitfähigkeit und der Leitfähigkeitsmechanismus von Silber-Wolfram-Legierungen, die Veränderung der Leitfähigkeit bei unterschiedlichen Zusammensetzungsverhältnissen sowie die Vorteile leitfähiger Anwendungen in elektrischen Geräten detailliert erläutert.

##### 2.3.4.1 Physikalische Natur der Leitfähigkeit und Leitfähigkeitsmechanismus der Silber-Wolfram-Legierung

Das physikalische Wesen der Leitfähigkeit liegt in der Beweglichkeit freier Elektronen im Material. Metalle lösen ihre äußeren Elektronen in ihrer Atomstruktur leicht ab und bilden so bewegliche Ladungsträger. Der Leitfähigkeitsmechanismus der Silber-Wolfram-Legierung beruht auf der hohen Leitfähigkeit des Silbers und seiner Rolle in der Legierung, kombiniert mit der strukturellen Stabilität

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Mikrooptimierung des Wolframs. Als Edelmetall verfügt Silber über reichlich freie Elektronen, die sich unter Einwirkung eines elektrischen Felds schnell bewegen können, was der Legierung eine hervorragende Stromübertragungseffizienz verleiht. Obwohl Wolfram eine geringe Leitfähigkeit aufweist, bilden sein hoher Schmelzpunkt und seine hohe Härte während des Sinterprozesses eine starke Skelettstruktur, die die kontinuierliche Verteilung der Silberphase unterstützt und die Stabilität des Strompfades gewährleistet.

Der Leitfähigkeitsmechanismus der Silber-Wolfram-Legierung wird durch ein pulvermetallurgisches Verfahren erreicht. Beim Flüssigphasensintern schmilzt Silber und benetzt die Wolframpartikel, wodurch ein durchgehendes leitfähiges Netzwerk entsteht. Elektronen können sich in der Silberphase effizient bewegen. Obwohl Wolframpartikel als verstärkende Phase nicht direkt zur Leitfähigkeit beitragen, reduzieren sie durch ihre gleichmäßige Verteilung die Widerstandskonzentrationen und verbessern die allgemeine Leitfähigkeit. Optimierte Sinterprozesse, beispielsweise durch Hochenergie-Kugelmahlen und heißisostatisches Pressen, verbessern die Dichte der Mikrostruktur weiter und reduzieren Hindernisse für die Stromübertragung durch Poren und Defekte. Die Duktilität von Silber ermöglicht es ihm zudem, sich an mikroskopische Spannungen anzupassen, die Integrität des leitfähigen Netzwerks zu erhalten und die Leistung auch bei mechanischem Kontakt oder Lichtbogenbildung aufrechtzuerhalten.

Die nichtmagnetischen Eigenschaften der Legierung unterstützen zudem den Leitfähigkeitsmechanismus und verhindern den Einfluss elektromagnetischer Störungen auf den Strompfad. Dieser Leitfähigkeitsmechanismus ermöglicht der Silber-Wolfram-Legierung eine gute Leistung in Hochstromumgebungen. Die hohe Leitfähigkeit von Silber bildet die Grundlage, und die strukturelle Unterstützung durch Wolfram sorgt für Langzeitstabilität. Die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur und die Kontinuität der Silberphase sind entscheidend.

Jede ungleichmäßige Verteilung oder unzureichende Silber-Flüssigphase kann den Widerstand erhöhen und die Leitfähigkeit verringern. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung des leitfähigen Netzwerks durch nanoskaliges Silberpulver oder die Erhöhung des Silbergehalts im leitfähigen Bereich durch funktionales Gradientendesign. Kurz gesagt: Der Leitfähigkeitsmechanismus der Silber-Wolfram-Legierung ermöglicht eine effiziente Stromübertragung durch die freie Elektronenbewegung des Silbers und die strukturelle Unterstützung des Wolframs und legt damit den Grundstein für seine Anwendung im elektrischen Bereich.

#### 2.3.4.2 Leitfähigkeitsänderungen bei unterschiedlichen Komponentenverhältnissen

Die Leitfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen zeigt eine signifikante Regelmäßigkeit bei Änderung des Komponentenverhältnisses. Das Verhältnis von Silber zu Wolfram beeinflusst direkt die Effizienz der Elektronenbewegung und die Widerstandseigenschaften. Dieses Änderungsmuster bietet Hinweise zur Optimierung des Legierungsdesigns entsprechend den Anwendungsanforderungen. Ein hoher Silbergehalt erhöht die Leitfähigkeit der Legierung deutlich, da die hohe Leitfähigkeit des Silbers der dominierende Faktor ist und Elektronen sich in der Silberphase frei bewegen können, was den Widerstandsverlust reduziert. Silber bildet als Matrix oder Bindephase während des Sinterprozesses ein

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

kontinuierliches Netzwerk. Die Stromübertragungseffizienz steigt mit zunehmendem Silberanteil, was sich besonders für Kontakt- und Elektrodenanwendungen eignet, die eine hohe Leitfähigkeit erfordern.

Mit steigendem Wolframgehalt nimmt die Leitfähigkeit allmählich ab, da die Leitfähigkeit von Wolfram deutlich geringer ist als die von Silber. Seine hohe Härte und sein hoher Schmelzpunkt verbessern die strukturelle Stabilität, erhöhen aber den Widerstandspfad. Ein hoher Wolframgehalt kann die Kontinuität der Silberphase einschränken und die Elektronenbewegung behindern, was zu einer verringerten Leitfähigkeit führt. Das ausgewogene Verhältnis von Silber und Wolfram ist entscheidend. Ein zu hoher Wolframgehalt kann zu einer unzureichenden Silber-Flüssigphase führen, was mikroskopische Poren oder eine ungleichmäßige Verteilung zur Folge hat und den Widerstand weiter erhöht. Umgekehrt kann ein zu hoher Silbergehalt zwar die Leitfähigkeit verbessern, aber die Verschleißfestigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit der Legierung schwächen und so ihre Gesamtleistung beeinträchtigen.

Auch die Auswirkung des Sinterprozesses auf die Komponentenanteile muss berücksichtigt werden. Die Benetzungswirkung von Silber beim Flüssigphasensintern nimmt mit seinem Anteil zu, wodurch die Konnektivität des leitfähigen Netzwerks verbessert wird. Sind die Wolframpartikel jedoch ungleichmäßig verteilt, kann die lokale Leitfähigkeit abnehmen. Durch Optimierung der Pulvermischung und der Sinterparameter, beispielsweise durch die Verwendung hochreiner Rohstoffe und einer inerten Atmosphäre, können Störfaktoren reduziert und die Leitfähigkeit stabil gehalten werden. In der Praxis zeigt die Leitfähigkeit bei einem bestimmten Silberanteil (beispielsweise einem höheren Anteil) einen linearen Anstieg, während sie bei einem dominanten Wolframanteil tendenziell stabil bleibt. Diese Regel zeigt, dass bei der Leitfähigkeitsoptimierung von Silber-Wolfram-Legierungen ein Gleichgewicht zwischen den Leitfähigkeitsanforderungen und den mechanischen Eigenschaften gefunden werden muss. Beispielsweise haben Kontakte von Hochspannungsschaltern tendenziell einen hohen Silberanteil, während der Wolframanteil bei Schweißelektroden moderat erhöht ist.

Dieses Änderungsgesetz bietet Flexibilität bei der Materialgestaltung. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Erhöhung der Dichte des leitfähigen Netzwerks durch nanoskaliges Silberpulver oder die Konzentration der Silberphase im leitfähigen Bereich durch funktionales Gradientendesign. Die Leitfähigkeitsänderung bei unterschiedlichen Komponentenverhältnissen wird auch von der Mikrostruktur beeinflusst, wobei Dichte und Partikelgleichmäßigkeit die Gewährleistung einer gleichbleibend hohen Leitfähigkeit gewährleisten. Kurz gesagt: Die Leitfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen zeigt mit der Veränderung des Silber-Wolfram-Verhältnisses eine Tendenz von zunehmender zu abnehmender Leitfähigkeit. Eine sinnvolle Anpassung des Verhältnisses ermöglicht optimale Leistung in elektrischen Anwendungen.

#### 2.3.4.3 Vorteile leitfähiger Anwendungen in elektrischen Geräten

Der Vorteil der leitfähigen Silber-Wolfram-Legierung in elektrischen Geräten macht sie zur idealen Wahl für Hochspannungsschalter, Relais, Widerstandsschweißelektroden und Hochfrequenzmodule. Dieser Vorteil beruht auf der hohen Leitfähigkeit von Silber in Kombination mit der strukturellen Unterstützung von Wolfram, die eine effiziente Stromübertragung und Langzeitstabilität gewährleistet. Silber-Wolfram-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Legierungen können in Hochstromumgebungen einen niedrigen Widerstand aufrechterhalten, Energieverluste reduzieren und die Zuverlässigkeit und Effizienz des Gerätebetriebs gewährleisten. Dies eignet sich besonders für Szenarien mit häufigem Schalten oder hohen Lasten.

Bei Hochspannungs-Leistungsschalterkontakten zeigt sich der Leitfähigkeitsvorteil der Silber-Wolfram-Legierung in einer effizienten Stromübertragung. Beim Abschalten hoher Ströme muss der Kontakt den Strompfad schnell herstellen und unterbrechen. Die hohe Leitfähigkeit von Silber sorgt für einen geringen Widerstand, reduziert thermische Effekte und Lichtbogenenergie, während die Wolfram-Stützstruktur die geometrische Stabilität des Kontakts gewährleistet. Diese Kombination ermöglicht dem Kontakt eine gleichbleibende Leistung bei mehreren Schaltvorgängen, was die Lebensdauer der Anlage verlängert und die Wartungskosten senkt. Im Vergleich zu herkömmlichen Materialien wie reinem Silber ist die Leitfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung zwar etwas geringer, die Verschleißfestigkeit und Lichtbogenbeständigkeit gleichen diesen Nachteil jedoch aus. In Relais und HF-Modulen unterstützt der Leitfähigkeitsvorteil der Silber-Wolfram-Legierung die Hochfrequenz-Signalübertragung und den verlustarmen Betrieb. Relais müssen schnell auf Stromänderungen reagieren. Das leitfähige Netzwerk der Silber-Wolfram-Legierung gewährleistet die Signalintegrität, während ihre nichtmagnetischen Eigenschaften elektromagnetische Störungen vermeiden, was besonders für elektromagnetisch sensible Umgebungen geeignet ist. HF-Module benötigen niederohmige Pfade zur Übertragung von Hochfrequenzsignalen. Die hervorragende Leitfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung erfüllt diese Anforderung.

Bei Widerstandsschweißelektroden sorgt der Leitfähigkeitsvorteil der Silber-Wolfram-Legierung für eine effiziente Stromkonzentration. Der Schweißprozess erfordert, dass die Elektrode schnell hohe Ströme auf das Werkstück überträgt. Die hohe Leitfähigkeit von Silber reduziert die Widerstandswärme, und die Härte von Wolfram erhält die Stabilität der Elektrodenform. Diese Eigenschaft macht den Schweißprozess gleichmäßiger, reduziert Defekte und verbessert die Schweißqualität. Im Vergleich zu kupferbasierten Elektroden weist die Silber-Wolfram-Legierung eine etwas geringere Leitfähigkeit auf, bietet aber aufgrund ihrer Verschleiß- und Lichtbogenfestigkeit eine längere Lebensdauer. Der Vorteil der Silber-Wolfram-Legierung in der Leitfähigkeit zeigt sich auch in ihrer Anpassungsfähigkeit. Durch Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses und Optimierung der Mikrostruktur kann die Legierung ein Gleichgewicht zwischen leitfähigen und mechanischen Eigenschaften in verschiedenen elektrischen Geräten erreichen. Oberflächenbehandlungen wie Polieren oder Beschichten verbessern die Leitfähigkeit zusätzlich und reduzieren den Einfluss der Oberflächenoxidation auf die Stromübertragung. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung des leitfähigen Netzwerks durch nanoskaliges Silberpulver oder die Integration intelligenter Überwachungstechnologie zur Echtzeit-Optimierung des Strompfads.

### 2.3.5 Eigenschaften und Wert der guten Wärmeleitfähigkeit einer Silber-Wolfram-Legierung

Die gute Wärmeleitfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen ist ein wichtiges Merkmal bei Hochtemperatur- und Hochleistungsanwendungen. Sie ermöglicht eine effiziente Wärmeübertragung und sorgt für Stabilität und Leistungsfähigkeit von Komponenten. Wärmeleitfähigkeit beschreibt die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fähigkeit eines Materials, Wärme zu übertragen. Silber-Wolfram-Legierungen erzielen durch die hohe Wärmeleitfähigkeit von Silber und die strukturelle Unterstützung von Wolfram hervorragende Wärmemanagementfähigkeiten. Diese Eigenschaft hängt nicht nur von den inhärenten Eigenschaften des Materials ab, sondern hängt auch eng mit der Optimierung seiner Mikrostruktur und seines Zusammensetzungsverhältnisses zusammen und bietet wichtige Unterstützung für elektronische Wärmeableitungssubstrate und Luft- und Raumfahrtkomponenten.

### 2.3.5.1 Grundprinzipien der Wärmeleitfähigkeit und des Wärmeleitmechanismus einer Silber-Wolfram-Legierung

Das Grundprinzip der Wärmeleitfähigkeit besteht darin, dass die Wärme im Material durch freie Elektronen und Gitterschwingungen übertragen wird. Metalle besitzen aufgrund ihrer hohen Anzahl freier Elektronen eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Der Wärmeleitmechanismus der Silber-Wolfram-Legierung beruht auf der hervorragenden Wärmeleitfähigkeit von Silber und seiner dominanten Rolle in der Legierung, kombiniert mit der strukturellen Stabilität und Mikrooptimierung von Wolfram. Als Edelmetall verfügt Silber über eine hohe Dichte freier Elektronen, die Wärmeenergie schnell übertragen können und der Legierung so ein effizientes Wärmemanagement ermöglichen. Obwohl Wolfram eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist, bilden sein hoher Schmelzpunkt und seine hohe Härte während des Sinterprozesses ein starkes Gerüst, das die kontinuierliche Verteilung der Silberphase unterstützt und die Stabilität der Wärmeübertragung gewährleistet.

Der Wärmeleitmechanismus der Silber-Wolfram-Legierung wird durch ein pulvermetallurgisches Verfahren erreicht. Während des Flüssigphasensinterprozesses schmilzt Silber und benetzt die Wolframpartikel, wodurch ein durchgehendes Wärmeleitnetzwerk entsteht. Wärme kann in der Silberphase effizient übertragen werden. Obwohl Wolframpartikel als verstärkende Phase nicht direkt zur Wärmeleitfähigkeit beitragen, reduzieren sie durch ihre gleichmäßige Verteilung die Konzentrationspunkte des Wärmewiderstands und verbessern die Gesamtkonsistenz der Wärmeleitfähigkeit. Optimierte Sinterprozesse, beispielsweise durch Hochenergie-Kugelmahlen und heißisostatisches Pressen, verbessern die Dichte der Mikrostruktur weiter und reduzieren Hindernisse für die Wärmeübertragung durch Poren und Defekte. Die Duktilität von Silber ermöglicht es ihm zudem, sich an Mikrospannungen anzupassen, die Integrität des Wärmeleitnetzwerks aufrechtzuerhalten und seine Leistung auch unter Temperaturwechselbedingungen aufrechtzuerhalten.

Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient der Legierung unterstützt zudem den Wärmeleitfähigkeitsmechanismus, reduziert die Auswirkungen thermischer Spannungen auf die Struktur und gewährleistet Stabilität im Langzeitbetrieb. Dieser Wärmeleitfähigkeitsmechanismus ermöglicht der Silber-Wolfram-Legierung, in Umgebungen mit hoher Wärmebelastung gute Leistung zu erbringen. Die hohe Wärmeleitfähigkeit des Silbers bildet die Grundlage, und die strukturelle Unterstützung des Wolframs gewährleistet langfristige Haltbarkeit. Die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur und die Kontinuität der Silberphase sind entscheidend. Jede ungleichmäßige Verteilung oder unzureichende flüssige Silberphase kann den Wärmewiderstand erhöhen und die Wärmeleitfähigkeitseffizienz verringern. Optimierungsansätze umfassen die Verbesserung des Wärmeleitfähigkeitsnetzwerks durch

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nanoskaliges Silberpulver oder die Erhöhung des Silbergehalts im wärmeleitenden Bereich durch ein funktionales Gradientendesign. Kurz gesagt: Der Wärmeleitfähigkeitsmechanismus der Silber-Wolfram-Legierung ermöglicht ein effizientes Wärmemanagement durch die freie Elektronenwärmeübertragung des Silbers und die strukturelle Unterstützung des Wolframs und legt damit den Grundstein für seine Leistung in Hochtemperaturanwendungen.

### 2.3.5.2 Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wärmeableitungseffekt

Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen und ihrer Wärmeableitung. Die Wärmeableitung beschreibt die Fähigkeit des Materials, Wärme von lokalen Hotspots an die Umgebung abzuleiten, was sich auf die Temperaturregelung und die Lebensdauer der Komponenten auswirkt. Die hohe Wärmeleitfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung ermöglicht eine schnelle Wärmeableitung von heißen Bereichen und verhindert so Leistungseinbußen oder Ausfälle durch lokale Überhitzung. Dieser Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wärmeableitung beruht auf der hohen Wärmeleitfähigkeit von Silber und der strukturellen Stabilität von Wolfram. Die Optimierung der Mikrostruktur verstärkt diesen Zusammenhang zusätzlich.

Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Silber ist die Grundlage des Wärmeableitungseffekts. Wärme wird in der Silberphase durch freie Elektronen effizient übertragen, wodurch die Ansammlung von Hotspot-Temperaturen reduziert wird. Obwohl Wolfram als verstärkende Phase eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist, bildet seine gleichmäßige Verteilung einen stabilen Wärmeübertragungspfad, um zu verhindern, dass Wärme in bestimmten Bereichen zurückgehalten wird. Die während des Sinterprozesses entstehende dichte Mikrostruktur verringert den Wärmewiderstand, und Wärme kann gleichmäßig von innen an die Oberfläche geleitet werden, was die Wärmeableitungseffizienz verbessert. Der Benetzungseffekt von Silber füllt die Lücken zwischen den Wolframpartikeln während des Flüssigphasensinterns und verbessert so die Kontinuität der Wärmeleitung und somit den Wärmeableitungseffekt. Die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur ist entscheidend. Porosität oder ungleichmäßige Verteilung können zu Wärmekonzentrationen führen und die Wärmeableitungskapazität schwächen.

Die hervorragende Wärmeableitung verbessert unmittelbar die Anwendungssicherheit von Silber-Wolfram-Legierungen. Bei elektronischen Wärmeableitungssubstraten leitet die Wärmeleitfähigkeit die von Leistungsbauelementen erzeugte Wärme schnell ab, um Chipüberhitzung und -beschädigung zu verhindern und so die Lebensdauer der Geräte zu verlängern. Bei Schweißelektroden reduziert der Wärmeableitungseffekt die Ansammlung von Lichtbogenwärme, erhält die Stabilität der Elektrodenoberfläche und die Schweißqualität. Bei Luft- und Raumfahrtkomponenten unterstützt die Wärmeleitfähigkeit das Wärmemanagement in Hochtemperaturumgebungen und gewährleistet die strukturelle Integrität. Der Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wärmeableitung wird zudem durch die Einsatzbedingungen begrenzt. Eine größere Wärmeableitungsfläche oder gute Umgebungsbedingungen für den Wärmeaustausch können den Effekt zusätzlich verstärken. Oberflächenbehandlungen wie Polieren oder Beschichten können die Wärmeableitung ebenfalls optimieren. Zu den Optimierungsmöglichkeiten gehören die Erhöhung der Dichte des thermischen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Netzwerks durch nanoskaliges Silberpulver oder die Konzentration der Silberphase im Wärmeableitungsbereich durch funktionales Gradientendesign. Die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit führt direkt zu einer verbesserten Wärmeableitung, reduziert die durch thermische Belastung verursachten Schäden an Komponenten und unterstützt Hochtemperatur- und Hochleistungsanwendungen.

### 2.3.5.3 Anwendungswert der Wärmeleitfähigkeit in Hochtemperatur-Arbeitsumgebungen

Die Wärmeleitfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen in Hochtemperaturumgebungen macht sie zu einem wichtigen Werkstoff für elektronische Geräte, Schweißsysteme und Luft- und Raumfahrtkomponenten. Hochtemperaturumgebungen stellen hohe Anforderungen an das Wärmemanagement von Materialien. Silber-Wolfram-Legierungen leiten Wärme dank ihrer guten Wärmeleitfähigkeit effektiv ab und erhalten so die Stabilität und Funktionalität von Komponenten. Dieser Anwendungswert spiegelt sich nicht nur in der schnellen Wärmeableitung wider, sondern auch in ihrer strukturellen Stabilität und Langlebigkeit, die den hohen Zuverlässigkeitsanforderungen unter Hochtemperaturbedingungen gerecht wird.

In elektronischen Geräten verbessert die Wärmeleitfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen die Leistung von Leistungsbauelementen und Wärmeableitungssubstraten. Elektronische Bauteile erzeugen im Betrieb viel Wärme, und herkömmliche Wärmeableitungsmaterialien können aufgrund unzureichender Wärmeleitfähigkeit durch Überhitzung versagen. Die hohe Wärmeleitfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung leitet die Wärme schnell vom Chip zum Kühlkörper ab und verhindert so Leistungseinbußen oder Schäden. Ihre strukturelle Stabilität gewährleistet Zuverlässigkeit im Langzeitbetrieb. Im Vergleich zu anderen Materialien sorgt der Vorteil der Wärmeleitfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung in Kombination mit ihrer Verschleißfestigkeit für eine gute Leistung in hochdichten elektronischen Geräten und verlängert deren Lebensdauer.

In Schweißsystemen trägt die Wärmeleitfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung zum stabilen Betrieb von Elektroden und Schweißköpfen bei. Der Schweißprozess ist mit hohen Temperaturen und Lichtbogenwirkung verbunden. Wärmestau kann zu Verformungen oder zum Schmelzen der Elektrode führen. Die Wärmeleitfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung leitet die Wärme effektiv ab und erhält die Integrität der Elektrodenoberfläche. Ihre hohe Härte widersteht Verschleiß und gewährleistet eine stabile Schweißqualität. Diese Eigenschaft macht die Silber-Wolfram-Legierung zum bevorzugten Material beim Widerstandsschweißen und Plasmaspritzen und verbessert die Produktionseffizienz deutlich.

Bei Luft- und Raumfahrtkomponenten unterstützt die Wärmeleitfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung das Wärmemanagement in Hochtemperaturumgebungen. Luft- und Raumfahrtgeräte sind im Betrieb extremen Hitzebelastungen ausgesetzt, und herkömmliche Materialien können aufgrund thermischer Belastung versagen. Die Wärmeleitfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung leitet Wärme von wichtigen Komponenten ab und reduziert in Kombination mit ihrem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten Verformungen durch thermische Zyklen. Ihre strukturelle Stabilität gewährleistet eine lange Lebensdauer.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



unter Hochtemperaturbedingungen und bietet zuverlässigen Halt für elektrische Anschlüsse und Gegengewichtskomponenten von Flugzeugen.

Der Anwendungswert der Wärmeleitfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung spiegelt sich auch in ihrer Anpassungsfähigkeit wider. Durch Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses und Optimierung der Mikrostruktur kann die Legierung ein Gleichgewicht zwischen Wärmeleitfähigkeit und mechanischen Eigenschaften in verschiedenen Hochtemperaturumgebungen erreichen. Oberflächenbehandlungen wie Polieren oder Beschichten verbessern die Wärmeableitung zusätzlich und reduzieren den Oberflächenwärmewiderstand.

Zu den Optimierungsmöglichkeiten gehören die Verbesserung des Wärmeleitfähigkeitsnetzwerks durch nanoskaliges Silberpulver oder die Integration intelligenter Überwachungstechnologie zur Optimierung des Wärmemanagements in Echtzeit. Kurz gesagt: Der Anwendungswert der Wärmeleitfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen in Hochtemperatur-Arbeitsumgebungen unterstützt deren Einsatz in der Elektronik, beim Schweißen und in der Luft- und Raumfahrt und verbessert die Zuverlässigkeit und Leistung von Komponenten deutlich.

### 2.3.6 Leistung und Mechanismus der Korrosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen

Die Korrosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen ist ein wichtiges Merkmal in einer Vielzahl von Anwendungsumgebungen. Sie ermöglicht es ihnen, chemischer oder elektrochemischer Erosion zu widerstehen und ihre langfristige Stabilität und Funktionalität zu bewahren. Korrosionsbeständigkeit bezeichnet die Fähigkeit eines Materials, dem Materialabbau in saurer, alkalischer oder feuchter Umgebung zu widerstehen. Silber-Wolfram-Legierungen erzielen durch die chemische Stabilität des Silbers und die antioxidativen Eigenschaften des Wolframs eine hervorragende Leistung. Diese Eigenschaft verschafft ihnen einen entscheidenden Vorteil bei elektrischen Kontakten, Schweißelektroden und Luft- und Raumfahrtkomponenten.

#### 2.3.6.1 Auswirkungen unterschiedlicher Korrosionsumgebungen auf Silber-Wolfram-Legierungen

Die Leistung von Silber-Wolfram-Legierungen in unterschiedlichen korrosiven Umgebungen variiert aufgrund der Wechselwirkung von Umgebungsbedingungen und chemischer Zusammensetzung, was sich auf die Oberflächeneigenschaften und die Lebensdauer auswirkt. Die Korrosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen hängt hauptsächlich von den Eigenschaften von Silber und Wolfram ab. Die Korrosionseffekte unterschiedlicher Umgebungen auf die beiden Phasen sind jedoch unterschiedlich, was eine wichtige Referenz für die Optimierung des Materialdesigns darstellt.

In feuchter Umgebung weist die Silber-Wolfram-Legierung eine gewisse Korrosionsbeständigkeit auf. Die Silberphase ist in Feuchtigkeit chemisch stabil, kann jedoch bei längerer Einwirkung zu leichter Oxidation führen und eine dünne Oxidschicht auf der Oberfläche bilden, die die Leitfähigkeit leicht beeinträchtigt. Aufgrund ihrer hohen chemischen Stabilität korrodiert die Wolframphase in Feuchtigkeit kaum. Enthält die Feuchtigkeit jedoch Sulfid oder Chlorid, kann Silber Sulfid- oder

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chlorierungsreaktionen eingehen, die die Oberflächenrauheit erhöhen und durch Oberflächenschutzmaßnahmen kontrolliert werden müssen. In dieser Umgebung behält die Silber-Wolfram-Legierung ihre grundlegende strukturelle Integrität und eignet sich für den Einsatz in elektrischen Geräten im Innenbereich.

In einer sauren Umgebung ist die Korrosionsbeständigkeit einer Silber-Wolfram-Legierung größeren Herausforderungen ausgesetzt. Saure Substanzen wie Schwefelsäure oder Salzsäure können die Silberphase angreifen und eine Auflösung der Oberfläche oder die Bildung von Korrosionsprodukten verursachen, welche die elektrische und thermische Leitfähigkeit beeinträchtigen. Die Wolframphase ist aufgrund ihrer hohen chemischen Inertheit sehr beständig gegen Säurekorrosion. Oxidationsmittel in einer sauren Umgebung können jedoch eine leichte Oberflächenoxidation von Wolfram verursachen und instabile Verbindungen bilden. Die mikrostrukturelle Dichte der Legierung spielt hierbei eine Schlüsselrolle. Porosität oder Defekte können das Eindringen von Korrosion beschleunigen und die Beständigkeit muss durch einen optimierten Sinterprozess erhöht werden. Anwendungen unter sauren Bedingungen sollten mit Vorsicht erfolgen und eignen sich nur für kurzfristige Einwirkung oder die Verwendung mit Schutzbeschichtungen.

In alkalischen Umgebungen ist die Korrosionsbeständigkeit der Silber-Wolfram-Legierung relativ gut. Silber weist eine hohe Beständigkeit gegen alkalische Substanzen auf, und die Oberfläche korrodiert nicht so leicht, wodurch Leitfähigkeit und mechanische Eigenschaften erhalten bleiben. Die Wolframphase weist auch in alkalischen Umgebungen stabile chemische Eigenschaften auf, was das Korrosionsrisiko verringert. Enthält die alkalische Umgebung jedoch Oxidationsmittel oder hohe Temperaturen, kann Silber langsam oxidieren, was die Langzeitstabilität beeinträchtigt. Die Korrosionsbeständigkeit der Legierung in dieser Umgebung ist besser als in saurer Umgebung und eignet sich für Kontaktteile in bestimmten Industrieanlagen.

Verunreinigungen und Temperaturschwankungen in der Umgebung beeinflussen ebenfalls die Korrosionswirkung. Eine Umgebung mit hohem Schwefel- oder Chloridgehalt kann die Korrosion von Silber verschlimmern, und steigende Temperaturen beschleunigen chemische Reaktionen und erhöhen die Erosionsrate. Die nichtmagnetischen Eigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung bieten ihr in elektromagnetisch empfindlichen Umgebungen weiterhin Vorteile, doch erfordert die Korrosionsbeständigkeit eine Anpassung der Einsatzbedingungen oder Schutzmaßnahmen an die jeweilige Umgebung. Kurz gesagt: Der Einfluss unterschiedlicher korrosiver Umgebungen auf die Silber-Wolfram-Legierung zeigt deren Grenzen und Potenzial hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit auf und bietet Orientierung bei der Materialauswahl und -optimierung.

#### 2.3.6.2 Intrinsischer Mechanismus der Korrosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen

Der inhärente Mechanismus der Korrosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen beruht auf dem synergistischen Effekt der chemischen Stabilität und Mikrostruktur von Silber und Wolfram. Dadurch ist die Legierung in verschiedenen Umgebungen korrosionsbeständig und behält ihre Leistung langfristig. Der Kern der Korrosionsbeständigkeit besteht in der Reduzierung chemischer Reaktionen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bzw. elektrochemischer Korrosion zwischen Material und Umgebung. Silber-Wolfram-Legierungen erreichen dieses Ziel durch die folgenden Mechanismen.

Erstens ist die chemische Stabilität von Silber die Grundlage der Korrosionsbeständigkeit. Silber besitzt bei Raumtemperatur eine starke antioxidative Wirkung gegenüber Sauerstoff und Wasser. Es bildet sich nur schwer eine dicke Oxidschicht auf der Oberfläche, was die Ansammlung von Korrosionsprodukten reduziert. Die Duktilität von Silber ermöglicht es ihm, sich auf mikroskopischer Ebene an Umweltbelastungen anzupassen und das Risiko von Rissen oder Abblättern zu verringern. Silber kann jedoch in schwefel- oder chloridhaltigen Umgebungen leicht reagieren und Sulfide oder Chloride bilden, was zusätzlichen Schutz vor der Wolframphase erfordert. Silber benetzt die Wolframpartikel beim Flüssigphasensintern und bildet eine dichte Grenzflächenstruktur, die die Korrosionsbeständigkeit insgesamt erhöht.

Zweitens ist die hohe chemische Inertheit von Wolfram der Schlüsselfaktor für die Korrosionsbeständigkeit. Wolfram hat einen extrem hohen Schmelzpunkt und eine stabile Kristallstruktur. Es reagiert nicht leicht mit üblichen korrosiven Medien in sauren, alkalischen oder feuchten Umgebungen, und die Oberfläche bleibt intakt. Dank seiner antioxidativen Wirkung widersteht Wolfram der Oxidation auch bei hohen Temperaturen oder sauerstoffreichen Umgebungen und bildet eine dünne Schutzschicht, die weitere Erosion reduziert. Wolframpartikel bilden in der Legierung eine Skelettstruktur, die den Eindringweg des korrosiven Mediums verteilt und die Ausbreitung der Erosion nach innen begrenzt. Diese Eigenschaft macht die Wolframphase zum Hauptbestandteil der Korrosionsbeständigkeit der Silber-Wolfram-Legierung.

Die Optimierung der Mikrostruktur erhöht die Korrosionsbeständigkeit zusätzlich. Während des Sinterprozesses füllt die flüssige Silberphase die Lücken zwischen den Wolframpartikeln, reduziert Poren und Defekte und verhindert das Eindringen korrosiver Medien durch Mikrorisse. Das heißisostatische Pressen oder Funkenplasmasintern verbessert die Dichte, verdichtet die Korngrenzen und reduziert die Korrosionsansatzpunkte. Die Grenzflächenbindungsstärke von Silber und Wolfram wird durch Hochenergie-Kugelmahlen und gleichmäßige Pulvermischung verbessert, was die Korrosionsbeständigkeit der Gesamtstruktur erhöht. Die nichtmagnetischen Eigenschaften unterstützen zusätzlich den Korrosionsschutzmechanismus und verhindern den Einfluss elektromagnetischer Störungen auf die Oberflächenstabilität. Die Korrosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen ist jedoch begrenzt. Die Silberphase neigt unter bestimmten Bedingungen (z. B. in schwefelhaltigen Umgebungen) zur Korrosion, und die hohe Härte der Wolframphase kann bei Langzeitbelastung Mikrorisse erzeugen, die die lokale Erosion beschleunigen. Die Optimierung des inneren Mechanismus erfordert ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Leitfähigkeit von Silber und der Korrosionsbeständigkeit von Wolfram. Die Anpassung des Zusammensetzungsverhältnisses und der Mikrostruktur ist entscheidend.

#### 2.3.6.3 Technologische Mittel zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit

Der Schlüssel zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen liegt in

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Verbesserung ihrer Langzeitbeständigkeit in verschiedenen Umgebungen. Dies wird durch eine Kombination aus Materialvorbereitung, Oberflächenbehandlung und Optimierung der Einsatzbedingungen erreicht. Die Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit zielt hauptsächlich auf die Korrosionsempfindlichkeit und mikroskopischen Defekte von Silber ab, kombiniert mit den antioxidativen Eigenschaften von Wolfram, um die Korrosionsbeständigkeit der Legierung zu optimieren.

Erstens ist die Optimierung des Zusammensetzungsverhältnisses die Grundlage für eine verbesserte Korrosionsbeständigkeit. Eine Erhöhung des Wolframgehalts kann die Korrosionsbeständigkeit der Legierung insgesamt verbessern, da die hohe chemische Inertheit von Wolfram die Reaktion mit korrosiven Medien verringert. Bei moderatem Silbergehalt bildet die Flüssigphasensinterung eine dichte Struktur und erhöht die Grenzflächenbindungskraft. Ein zu hoher Silbergehalt kann jedoch das Korrosionsrisiko erhöhen, weshalb durch Anpassung des Verhältnisses ein Ausgleich erreicht werden muss. Spurenzusätze wie Molybdän oder Chrom können die Oxidationsbeständigkeit von Wolfram verbessern, der Gehalt muss jedoch kontrolliert werden, um die Leitfähigkeit nicht zu beeinträchtigen.

Zweitens kann die Optimierung des Sinterprozesses die Dichte der Mikrostruktur deutlich verbessern. Flüssigphasensintern füllt die Lücken zwischen Wolframpartikeln durch die Benetzungswirkung von Silber, reduziert die Porosität und verhindert das Eindringen korrosiver Medien. Die Funkenplasmasinterungstechnologie bildet durch gepulsten Strom und hohen Druck schnell eine dichte Struktur, hemmt übermäßiges Kornwachstum und verbessert die Oberflächengleichmäßigkeit. Das heißisostatische Pressverfahren eliminiert Restdefekte durch omnidirektionalen Hochdruck und erhöht so die Korrosionsbeständigkeit zusätzlich. Die Vakuum- oder hochreine Argon-Sinterumgebung verhindert das Eindringen oxidierter Verunreinigungen, erhält die Reinheit von Wolfram und Silber und reduziert die Korrosionsempfindlichkeit.

Drittens ist die Oberflächenbehandlung ein wirksames Mittel zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit. Korrosionsschutzbeschichtungen, die durch plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung aufgebracht werden, wie beispielsweise Titanitrid oder Chromkarbid, können eine Schutzschicht auf der Legierungsoberfläche bilden, korrosive Medien isolieren und die Oxidation oder Sulfidierung von Silber reduzieren. Elektrochemisches Polieren optimiert die Oberflächenbeschaffenheit, reduziert den Korrosionsansatz und erhöht die Korrosionsbeständigkeit. Eine Oberflächenpassivierung verbessert die Korrosionsbeständigkeit zusätzlich durch die Bildung einer stabilen Oxidschicht, die sich besonders für schwefel- oder chloridhaltige Umgebungen eignet. Studien haben gezeigt, dass geeignete Beschichtungen die Korrosionsrate deutlich senken und die Lebensdauer von Bauteilen verlängern können.

Viertens können Umweltmanagement und die Optimierung der Einsatzbedingungen die Korrosionsbeständigkeit weiter verbessern. In feuchten oder säurehaltigen Umgebungen sollten abgedichtete Konstruktionen oder Schutzgase verwendet werden, um den Kontakt mit korrosiven Medien zu reduzieren. Kontrollieren Sie bei Schweiß- oder Elektroanwendungen Betriebsparameter wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit, um Korrosionsrisiken zu reduzieren. Intelligente Überwachungstechnologie erkennt den Korrosionsstatus in Echtzeit über eingebettete Sensoren,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



optimiert Wartungszyklen und verhindert übermäßige Erosion. Ein funktional abgestuftes Materialdesign erhöht den Wolframgehalt an der Oberfläche, um die Korrosionsschutzschicht zu verbessern und gleichzeitig die Leitfähigkeit der inneren Silberphase zu erhalten.

Die kombinierte Anwendung dieser Verfahren ermöglicht es der Silber-Wolfram-Legierung, in feuchten, sauren oder industriellen Umgebungen gute Leistungen zu erbringen, die Lebensdauer der Komponenten zu verlängern und die Zuverlässigkeit zu verbessern. Optimierungspotenziale umfassen die Entwicklung selbstreparierender Beschichtungen zur dynamischen Reparatur von Korrosionsschäden oder die Verbesserung der Oberflächengleichmäßigkeit durch nanoskaliges Wolframpulver.

## 2.4 CTIA GROUP LTD. Sicherheitsdatenblatt für Silber-Wolfram-Legierungen

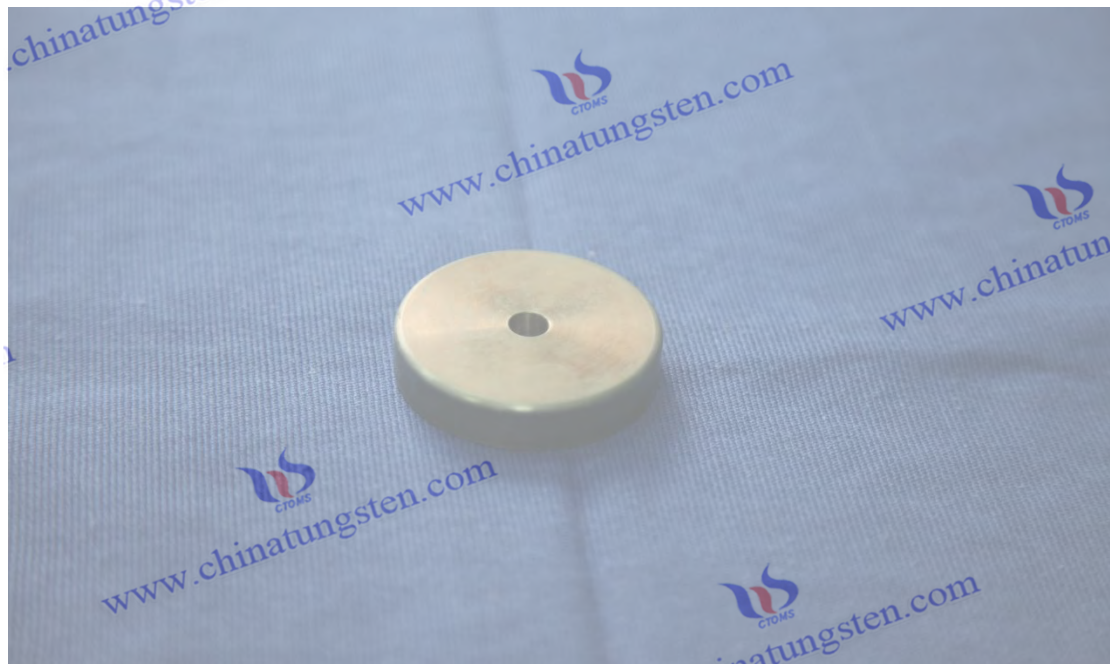
Sicherheitsdatenblätter (MSDS) werden üblicherweise vom Hersteller von China Tungsten Intelligent Manufacturing bereitgestellt. Sie enthalten die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Materials, Hinweise zur sicheren Verwendung und Hinweise zu potenziellen Gefahren. Je nach den verfügbaren relevanten Informationen kann sich der MSDS-Gehalt der Silber-Wolfram-Legierung auf die allgemeinen Standards für Wolfram- oder Silberlegierungen beziehen.

Informationen zur Zusammensetzung: Das Verhältnis von Silber (Ag) und Wolfram (W) (z. B. 30 % – 70 % Ag, 70 % – 30 % W) hängt vom jeweiligen Produkt ab.

Physikalische Eigenschaften: Dichte ca. 12,0–15,0 g/cm<sup>3</sup>, Schmelzbereich variiert je nach Silbergehalt, Leitfähigkeit 40–60 % IACS.

Gesundheitsgefahren: Silber und Wolfram selbst sind im Allgemeinen nicht besonders giftig.

Sicherheitsmaßnahmen: Es wird empfohlen, Schutzausrüstung zu tragen.



CTIA GROUP LTD Silber-Wolfram-Legierung

### 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<br>(%weight) | Density<br>(/g.cm3) | Electrical<br>conductivity | Electrical<br>resistivity | Hardness<br>(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](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [silver-tungsten.net](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

### Kapitel 3: Beobachtung der Mikrostruktureigenschaften und Leistungskorrelation von Silber-Wolfram-Legierungen

Die Mikrostruktur der Silber-Wolfram-Legierung bildet die Grundlage ihrer Leistungsfähigkeit und beeinflusst direkt ihre elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Härte und Korrosionsbeständigkeit. Die Mikrostruktur wird pulvermetallurgisch geformt, und die Wechselwirkung zwischen Silber als Bindephase und Wolfram-Verstärkungsphase prägt die einzigartige Kornmorphologie, Phasenverteilung und Grenzflächeneigenschaften. Diese Struktureigenschaften stehen in engem Zusammenhang mit den mechanischen und funktionellen Eigenschaften der Legierung und bilden eine wichtige Grundlage für die Optimierung des Herstellungsprozesses und die Verbesserung der Anwendungsleistung.

#### 3.1 Beobachtung der Mikrostruktureigenschaften einer Silber-Wolfram-Legierung

Die Mikrostruktur der Silber-Wolfram-Legierung wurde mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM), Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) und Röntgenbeugung (XRD) untersucht. Dadurch wurden die innere Kristallstruktur und die Phasenverteilung sichtbar. Diese Beobachtungen liefern direkte Hinweise zum Verständnis der Eigenschaften der Legierung und verdeutlichen die Wechselwirkung zwischen Silber und Wolfram während des Sinterprozesses und deren Auswirkungen auf die Mikrostruktur.

##### 3.1.1 Kornmorphologie und Größeneigenschaften

Die Kornmorphologie und Größeneigenschaften von Silber-Wolfram-Legierungen sind die Kernaspekte der Mikrostruktur, die sich direkt auf die mechanischen Eigenschaften und die Haltbarkeit der Legierung auswirken. Die Kornmorphologie zeigt sich hauptsächlich als polygonale oder nahezu kugelförmige Struktur von Wolframpartikeln, während die Silberphase eine kontinuierliche oder netzartige Verteilung um die Wolframpartikel aufweist. Wolframpartikel sind üblicherweise größer und dienen als Verstärkungsphase als Skelettstütze, während die Silberphase die Lücken beim Sintern in der Flüssigphase füllt und feinere Körner bildet. Dieser morphologische Unterschied rührt von den physikalischen und chemischen Eigenschaften der beiden her. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram hält es während des Sinterns in einem festen Zustand, während der niedrige Schmelzpunkt von Silber dafür sorgt, dass es schmilzt und die Wolframpartikel benetzt.

Die Korngröße wird durch den Herstellungsprozess und die Sinterbedingungen beeinflusst. Die Partikelgröße des ursprünglichen Wolframpulvers liegt üblicherweise im Submikrometer- bis Mikrometerbereich und kann durch Hochenergie-Kugelmahlen weiter auf den Nanometerbereich verfeinert werden. Sintertemperatur und -zeit spielen eine Schlüsselrolle für das Kornwachstum. Hohe Temperaturen und langes Sintern können zu einem abnormalen Wachstum der Wolframpartikel führen, während die Silberphase aufgrund der erhöhten Fließfähigkeit größere Körner bildet. Optimierte Verfahren wie das Funkenplasmasintern (SPS) verhindern übermäßiges Kornwachstum durch schnelles Erhitzen und Druckbeaufschlagung. Dadurch werden die Wolframpartikel in einem kleineren Größenbereich gehalten, und die Silberphase weist eine feine und gleichmäßige Verteilung auf.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beobachtungsergebnisse zeigen, dass mit der kleineren Korngröße die Korngrenzendichte steigt und Härte und Festigkeit der Legierung in der Regel entsprechend zunehmen. Die Gleichmäßigkeit der Kornmorphologie und -größe hat einen wichtigen Einfluss auf die Leistung. Eine ungleichmäßige Kornverteilung kann zu lokalen Spannungskonzentrationen führen und so die Biegefestigkeit und Zähigkeit verringern. Während des Sinterprozesses kann heißisostatisches Pressen (HIP) Mikrodefekte beseitigen und die Kornkonsistenz durch omnidirektionalen Druck verbessern. Die Verwendung von nanoskaligem Wolframpulver verfeinert die Körner weiter, verstärkt die Korngrenzenverstärkung und verbessert die Verschleiß- und Lichtbogenerosionsbeständigkeit der Legierung deutlich. Die Beobachtung der Kornmorphologie zeigt auch den Benetzungsgrad von Silber mit Wolframpartikeln. Eine gute Benetzung bildet eine dichte Struktur, reduziert die Porosität und verbessert die allgemeine Leistungsstabilität. Kurz gesagt: Die Kornmorphologie und die Größeneigenschaften von Silber-Wolfram-Legierungen werden durch den Herstellungsprozess bestimmt, der ihre Mikrostruktur und makroskopischen Eigenschaften maßgeblich beeinflusst.

### 3.1.2 Phasenverteilung und Grenzflächeneigenschaften

Die Phasenverteilung und die Grenzflächeneigenschaften einer Silber-Wolfram-Legierung sind wichtige Bestandteile der Mikrostruktur und bestimmen direkt die elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Legierung. Die Phasenverteilung manifestiert sich hauptsächlich darin, dass Wolframpartikel als dispergierte Phase in die Silbermatrix oder Bindungsphase eingebettet sind und die Silberphase ein kontinuierliches Netzwerk oder lokale Aggregate um die Wolframpartikel bildet. Der Volumenanteil der Wolframphase ist üblicherweise hoch und nimmt den Großteil des Volumens ein, während die Silberphase während des Sinterprozesses die Lücken füllt und die Bindung zwischen den Phasen verstärkt. Diese Phasenverteilung wird durch Pulvermetallurgie erreicht und wird maßgeblich von der Gleichmäßigkeit der Pulvermischung und den Sinterparametern beeinflusst.

Die Grenzflächeneigenschaften sind ein wesentlicher Bestandteil der Phasenverteilung, und die Grenzflächenbindungskraft zwischen Silber und Wolfram beeinflusst direkt die Gesamtleistung der Legierung. Beobachtungen zeigen, dass die Silberphase die Oberfläche der Wolframpartikel beim Flüssigphasensintern benetzt und so eine dichte Grenzflächenschicht bildet, die Hohlräume und Defekte reduziert. Der Benetzungsgrad an der Grenzfläche wird durch den Silbergehalt und die Sintertemperatur gesteuert. Bei einem moderaten Silbergehalt ist die Grenzfläche gut gebunden und weist einen fließenden Übergang auf. Ein zu hoher Silbergehalt kann zu einer übermäßigen Silber-Flüssigphase führen, die mikroskopische Ansammlungen an der Grenzfläche bildet und die Stabilität beeinträchtigt. Die Silberphasenschicht zwischen den Wolframpartikeln wirkt zudem als Puffer, absorbiert thermische und mechanische Belastungen und erhöht die Zähigkeit der Legierung.

Die Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung ist entscheidend für die Leistung. Eine ungleichmäßige Verteilung kann zu lokal verringerter elektrischer oder thermischer Leitfähigkeit führen, insbesondere bei hohem Wolframgehalt. Eine unzureichende Silberphase kann Poren bilden und den elektrischen oder thermischen Widerstand erhöhen. Optimierte Sinterprozesse wie Hochenergie-Kugelmahlen und Vakuumsintern können die Konsistenz der Phasenverteilung verbessern und die Ansammlung von

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Verunreinigungen und Oxiden an der Grenzfläche reduzieren. Die Beobachtung der Grenzflächeneigenschaften verdeutlicht auch die Rolle der Korngrenzenverstärkung. Die Silberphase begrenzt die Versetzungsbewegung an der Korngrenze und erhöht die Härte. Reicht die Bindungskraft der Grenzfläche jedoch nicht aus, können Mikrorisse entstehen, die die Haltbarkeit verringern.

Die Verwendung von nanoskaligem Wolframpulver optimiert die Phasenverteilung und die Grenzflächeneigenschaften zusätzlich. Kleine Partikel vergrößern die Grenzflächenfläche, verbessern die Benetzungseffizienz von Silber und bilden eine dichtere Mikrostruktur. Das heißisostatische Pressverfahren komprimiert die Grenzfläche unter hohem Druck, um die Bindungskraft zwischen den Phasen zu erhöhen und Grenzflächendefekte zu reduzieren. Auch die chemische Reaktion oder Diffusion an der Grenzfläche beeinflusst die Eigenschaften. Die geeignete Sinteratmosphäre kann den Reaktionsgrad steuern und die Reinheit von Wolfram und Silber erhalten. Kurz gesagt: Die Phasenverteilung und die Grenzflächeneigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung werden durch Prozesskontrolle optimiert, die in direktem Zusammenhang mit ihren elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften steht und eine wichtige Grundlage für Leistungssteigerungen bildet.

### 3.1.3 Mikroskopische Erscheinungsformen von Porosität und Defekten

Die Porosität und die mikroskopische Manifestation von Defekten in Silber-Wolfram-Legierungen sind wichtige Aspekte der Mikrostruktur, die sich direkt auf die mechanischen Eigenschaften, die elektrische Leitfähigkeit und die Korrosionsbeständigkeit der Legierung auswirken. Porosität bezeichnet den Anteil ungefüllter Hohlräume in der Legierung, der üblicherweise durch den Sinterprozess und die Eigenschaften des Rohmaterials bestimmt wird. Zu den Defekten zählen Mikrorisse, ungebundene Bereiche und die Ansammlung von Verunreinigungen, die zusammen die Gesamtdichte und Stabilität der Legierung bestimmen. Die Beobachtung dieser Eigenschaften hilft, Leistungsengpässe zu erkennen und den Herstellungsprozess zu optimieren.

Porosität in Silber-Wolfram-Legierungen zeigt sich hauptsächlich in Form winziger, zwischen der Silberphase und der Wolframphase verstreuter Hohlräume, und die Morphologie ist meist kugelförmig oder unregelmäßig. Die Porenbildung entsteht durch Gaseinschluss beim Mischen der Pulver oder dadurch, dass beim Sintern nicht genügend flüssige Silberphase vorhanden ist, um die Lücken komplett zu füllen. Beobachtungen zeigen, dass Bereiche mit höherer Porosität normalerweise dort auftreten, wo die Wolframpartikel dicht sind, und eine ungleichmäßige Verteilung der Silberphase kann dieses Phänomen verschlimmern. Eine hohe Porosität führt zu einer verringerten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit, da Wärme und Strom in den Lücken nur schwer übertragen werden können. Gleichzeitig können Poren auch zu Spannungskonzentrationen werden, wodurch Biegefestigkeit und Zähigkeit verringert werden. SEM-Analysen zeigen, dass sich die Leistung der Legierung deutlich verbessert, wenn die Porosität unter einem bestimmten Niveau liegt, insbesondere bei Anwendungen, bei denen hohe Zuverlässigkeit erforderlich ist.

Zu den mikroskopischen Manifestationen von Defekten zählen Mikrorisse und ungebundene Grenzflächen, die üblicherweise an der Silber-Wolfram-Grenzfläche oder zwischen Wolframpartikeln

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

auftreten. Mikrorisse können durch thermische Spannungen oder Abkühlungsschrumpfung beim Sintern entstehen, insbesondere wenn die Wärmeausdehnungskoeffizienten der Silberphase und der Wolframphase stark voneinander abweichen. Die ungebundene Grenzfläche äußert sich darin, dass die Silberphase die Wolframpartikel nicht vollständig benetzt, was zu einem schlechten lokalen Kontakt führt und die strukturelle Integrität beeinträchtigt. TEM-Beobachtungen zeigen, dass defekte Bereiche häufig mit der Ansammlung von Verunreinigungen einhergehen, die bei einer schlechten Sinteratmosphäre entstehen und die Grenzflächenbindung weiter schwächen können. Das Vorhandensein von Defekten kann zudem das Eindringen korrosiver Medien beschleunigen und die Korrosionsbeständigkeit verringern.

Die Kontrolle von Porosität und Defekten ist der Schlüssel zur Optimierung der Mikrostruktur. Sintervorgänge wie das heißisostatische Pressen verdichten das Material durch Druck in alle Richtungen, wodurch Poren und Mikrorisse deutlich reduziert und die Dichte erhöht wird. Funkenplasmasintern hemmt die Defektbildung und verbessert die Grenzflächenhaftung durch schnelles Erhitzen und Druckbeaufschlagung. Die Verwendung hochreiner Rohstoffe und eine gleichmäßige Pulvermischung können Verunreinigungen und Gaseinschlüsse reduzieren und die anfängliche Defektrate senken. Beobachtungsergebnisse zeigen, dass die Porosität der optimierten Silber-Wolfram-Legierung auf ein extrem niedriges Niveau reduziert, die Defektdichte deutlich verringert und die Leistungskonsistenz verbessert werden kann. Kurz gesagt: Die mikroskopischen Erscheinungsformen von Porosität und Defekten können durch Prozesskontrolle verbessert werden, was in direktem Zusammenhang mit der Gesamtleistung der Legierung steht.

### 3.1.4 Mikrostrukturunterschiede bei unterschiedlichen Herstellungsverfahren

Die Mikrostruktur von Silber-Wolfram-Legierungen weist aufgrund unterschiedlicher Herstellungsverfahren, wie z. B. traditionellem Pulverpressen, Heißisostatischem Pressen (HIP) und Funkenplasmasintern (SPS), erhebliche Unterschiede auf. Jede Methode hat einen individuellen Einfluss auf Kornmorphologie, Phasenverteilung und Defektzustand. Die Berücksichtigung dieser Unterschiede hilft, das optimale Verfahren für eine bestimmte Anwendung auszuwählen und die Legierungseigenschaften zu optimieren.

Das traditionelle Presspulversintervorgang ist eine klassische Methode zur Herstellung von Silber-Wolfram-Legierungen. Die Mikrostruktur ist durch in der Silbermatrix dispergierte Wolframpartikel gekennzeichnet, wobei die Silberphase ein Netzwerk oder lokale Aggregate bildet. Die Korngröße ist groß, die Wolframpartikel sind meist polygonal, und die Silberphase füllt die durch Flüssigphasensinterung entstandenen Lücken, ist jedoch ungleichmäßig verteilt. Die Porosität ist relativ hoch und verteilt sich zwischen den Wolframpartikeln oder in schwachen Bereichen der Silberphase. Defekte wie Mikrorisse und ungebundene Grenzflächen treten häufiger auf. Die elektrische und thermische Leitfähigkeit sind begrenzt, die Härte mittel, die Herstellungskosten jedoch gering, was für die Massenproduktion geeignet ist. Das heißisostatische Pressverfahren (HIP) verbessert die Mikrostruktur durch omnidirektionale Hochdruck- und Hochtemperaturbehandlung deutlich. Die Wolframpartikel werden gleichmäßiger verteilt, die Silberphase bildet ein kontinuierliches Netzwerk, die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Porosität wird deutlich reduziert und Defekte wie Mikrorisse werden reduziert. Die Korngröße wird durch die Hochdruckkompression verfeinert, die Grenzflächenbindungskraft erhöht und ein fließender Übergang erreicht. Die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit werden verbessert, ebenso wie Härte und Biegefestigkeit deutlich verbessert. Dies eignet sich für Anwendungen, die hohe Dichte und Zuverlässigkeit erfordern, wie beispielsweise Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt. Nachteile des HIP-Verfahrens sind die komplexe Ausrüstung und die hohen Kosten, was seine breite Anwendung einschränkt.

Das Spark-Plasma-Sintern (SPS)-Verfahren erzeugt durch gepulsten Strom und schnelles Erhitzen eine einzigartige Mikrostruktur. Die Wolframpartikel bleiben klein, die Silberphase ist gleichmäßig verteilt, Poren und Defekte sind nahezu unsichtbar und die Korngrenzendichte ist hoch. Die Benetzung an der Grenzfläche ist hervorragend, und die Silberphase ist eng mit dem Wolfram verbunden, wodurch Spannungskonzentrationspunkte reduziert werden. Die elektrische Leitfähigkeit, die Wärmeleitfähigkeit und die Härte erreichen ein hohes Niveau, das sich besonders für Hochleistungskontakt- und Elektrodenanwendungen eignet. Die Schnelligkeit des SPS-Prozesses verhindert übermäßiges Kornwachstum, stellt jedoch hohe Anforderungen an die Reinheit der Rohstoffe und die Partikelgröße sowie eine präzise Prozesskontrolle. Die mikrostrukturellen Unterschiede verschiedener Herstellungsverfahren werden auch durch die Sinteratmosphäre und die Sinterparameter beeinflusst. Vakuum oder eine inerte Atmosphäre reduzieren oxidative Verunreinigungen und verbessern die Phasenverteilung; hohe Temperaturen und langes Sintern können Kornwachstum verursachen und die Gleichmäßigkeit beeinträchtigen. Beobachtungsergebnisse zeigen, dass die Mikrostruktur des SPS-Verfahrens die dichteste ist, gefolgt vom HIP-Verfahren, während das traditionelle Presspulversintern ungünstig ist.

### 3.2 Intrinsische Beziehung zwischen der Struktur einer Silber-Wolfram-Legierung und den makroskopischen Eigenschaften

Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Mikrostruktur der Silber-Wolfram-Legierung und ihren makroskopischen Eigenschaften. Kornstruktur, Phasenverteilung und Grenzflächeneigenschaften beeinflussen durch physikalische und chemische Mechanismen Festigkeit, Zähigkeit, elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Legierung. Dieser Zusammenhang bildet die theoretische Grundlage für die Optimierung des Herstellungsprozesses und die Verbesserung der Anwendungsleistung. Die Wechselwirkung zwischen Silber als Bindephase und Wolfram als Verstärkungsphase prägt die Mikrostruktur, die wiederum die Leistung der Legierung in elektrischen Kontakten, Schweißelektroden und Luft- und Raumfahrtkomponenten bestimmt.

#### 3.2.1 Einfluss der Kornstruktur auf Festigkeit und Zähigkeit

Kornstruktur bildet den Kern der Mikrostruktur einer Silber-Wolfram-Legierung. Morphologie, Größe und Ausrichtung der Körner beeinflussen die Festigkeit und Zähigkeit der Legierung durch Korngrenzenverstärkung und Versetzungsbewegungsmechanismen. Festigkeit bezeichnet die Widerstandsfähigkeit einer Legierung gegen Verformung oder Bruch, während Zähigkeit ihre Fähigkeit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

widerspiegelt, Energie zu absorbieren und Rissausbreitung zu widerstehen. Veränderungen der Kornstruktur beeinflussen direkt die Leistung beider Legierungen.

Der Einfluss der Korngröße auf die Festigkeit folgt dem Hall-Pasch-Effekt. Je kleiner das Korn, desto höher die Korngrenzendichte, desto stärker ist die Versetzungsbewegung eingeschränkt und desto höher sind Streckgrenze und Zugfestigkeit. In einer Silber-Wolfram-Legierung dienen Wolframpartikel als Verstärkungsphase, und die Korngröße ist üblicherweise größer, während die Silberphase durch Flüssigphasensinterung feinere Körner bildet. Sinterverfahren wie das Funkenplasmasintern (SPS) hemmen das Kornwachstum durch schnelles Erhitzen, verfeinern Wolframpartikel und Silberphasen und verbessern die Festigkeit deutlich. Beobachtungen zeigen, dass die aus nanoskaligem Wolframpulver hergestellte Legierung eine reduzierte Korngröße und eine deutlich verbesserte Festigkeit aufweist, was sie besonders für Anwendungen geeignet macht, die eine hohe Biegefestigkeit erfordern.

Der Einfluss von Korngrenzen auf die Zähigkeit ist komplexer. Feine Körner vergrößern die Korngrenzfläche, begrenzen die Rissausbreitung und verbessern die Zähigkeit. Reicht die Bindungskraft der Korngrenzen jedoch nicht aus, können Mikrorisse entstehen, die die Zähigkeit mindern. Die Silberphase benetzt die Wolframpartikel an der Korngrenze, bildet eine Pufferschicht, absorbiert mechanische und thermische Spannungen und erhöht die Zähigkeit. Heißisostatisches Pressen (HIP) verbessert die Korngrenzenbindung, reduziert Defekte und optimiert die Zähigkeit durch hohen Druck. Bei mittlerem Silbergehalt füllt die flüssige Phase die Lücken, wodurch die Korngrenzen deutlich verstärkt werden. Ein zu hoher Silbergehalt kann die Korngrenze zu weich machen und die Zähigkeit verringern. Auch Kornorientierung und -morphologie beeinflussen die Leistung. Polygonale oder nahezu kugelförmige Wolframpartikel verteilen Spannungen und erhöhen Festigkeit und Zähigkeit. Unregelmäßige Partikel können lokale Spannungskonzentrationen verursachen und die Stabilität verringern. Sintertemperatur und -zeit regulieren das Kornwachstum. Zu hohe Temperaturen können zu abnormalem Wachstum führen und die Gleichmäßigkeit beeinträchtigen. Mikrostrukturelle Untersuchungen zeigen, dass Silber-Wolfram-Legierungen mit optimierter Kornstruktur ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Festigkeit und Zähigkeit erreichen und sich für Kontaktanwendungen unter dynamischen Belastungen und in Lichtbogenumgebungen eignen. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verfeinerung der Körner durch Nanostrukturierung oder die Anpassung der Korngrenzenverteilung durch funktionales Gradientendesign zur umfassenden Leistungssteigerung.

### 3.2.2 Zusammenhang zwischen Phasenverteilung und elektrischer und thermischer Leitfähigkeit

Die Phasenverteilung ist ein wichtiges Merkmal der Mikrostruktur einer Silber-Wolfram-Legierung. Der Verteilungszustand und die Grenzflächenbindung der Phasen beeinflussen direkt die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit und weisen ein spezifisches Korrelationsgesetz auf. Elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit spiegeln die Übertragungseffizienz von Strom bzw. Wärme wider. Die Gleichmäßigkeit und Kontinuität der Phasenverteilung sind der Schlüssel zur Bestimmung dieser Eigenschaften. Die Silberphase ist die Hauptquelle der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit. Silber bildet als Matrix oder Bindungsphase ein kontinuierliches Netzwerk, durch das Elektronen und Wärme effizient übertragen werden. Obwohl die elektrische und thermische Leitfähigkeit der Wolframphase

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



gering ist, reduziert ihre gleichmäßige Verteilung die Konzentrationspunkte des elektrischen und thermischen Widerstands und verbessert die Gesamtleistung. Die Kontinuität der Phasenverteilung wird durch Flüssigphasensintern bestimmt. Bei einem hohen Silbergehalt ist das Netzwerk stärker verbunden, und die elektrische und thermische Leitfähigkeit verbessern sich deutlich. Bei einem dominanten Wolframgehalt kann die Silberphase brechen und die Leistung nimmt ab. Beobachtungen zeigen, dass die Struktur, in der die Silberphase die Wolframpartikel gleichmäßig umhüllt, die beste elektrische und thermische Leitfähigkeit aufweist.

Die Eigenschaften der Grenzfläche haben einen erheblichen Einfluss auf die Leistung. Die Grenzflächenbindungskraft zwischen Silber und Wolfram wird durch Benetzung verstärkt, wodurch Hohlräume und Defekte reduziert und die elektrische und thermische Leitfähigkeit verbessert werden. Bei mäßiger Schichtdicke der Silberphase an der Grenzfläche werden Wärme und Strom gleichmäßig übertragen. Eine zu dicke Silberschicht kann den Wärmewiderstand erhöhen, während eine zu dünne Schicht die Kontinuität beeinträchtigt. Sinterverfahren wie heißisostatisches Pressen verdichten die Grenzfläche, und Funkenplasmasintern optimieren die Phasenverteilung und verbessern so die Leistungskonsistenz deutlich.

Auch der Volumenanteil der Phasenverteilung weist ein regelmäßiges Muster auf. Mit steigendem Silbergehalt nehmen die elektrische und thermische Leitfähigkeit tendenziell zu. Ab einem bestimmten Anteil schwächt sich dieser Anstieg jedoch ab, da die Barrierewirkung der Wolfrumphase verstärkt wird. Mit steigendem Wolframgehalt nehmen die elektrische und thermische Leitfähigkeit ab, die strukturelle Stabilität verbessert sich jedoch, was für Hochtemperaturanwendungen geeignet ist. Mikrostrukturelle Untersuchungen zeigen, dass die optimierte Phasenverteilung die Silber-Wolfram-Legierung für Hochspannungsschalterkontakte und Wärmeableitungssubstrate gut geeignet macht.

### 3.2.3 Auswirkungen von Porosität und Defekten auf Härte und Korrosionsbeständigkeit

Porosität und Defekte sind wichtige Merkmale der Mikrostruktur von Silber-Wolfram-Legierungen. Sie wirken sich direkt auf Härte und Korrosionsbeständigkeit aus und bestimmen die Leistung der Legierung in Umgebungen mit hohem Verschleiß und Korrosion. Porosität bezeichnet den Anteil ungefüllter Hohlräume im Material. Zu den Defekten zählen Mikrorisse und ungebundene Grenzflächen. Diese Faktoren beeinflussen Dichte und Oberflächenstabilität.

Die Auswirkung der Porosität auf die Härte zeigt sich hauptsächlich in ihrer Störung der Korngrenzen und der Phasenverteilung. Eine höhere Porosität führt zu Diskontinuität der Korngrenzen, behindert die Versetzungsbewegung und das Gleiten der Korngrenzen und verringert die Härte. In Silber-Wolfram-Legierungen sind die Poren üblicherweise zwischen den Wolframpartikeln oder in schwachen Bereichen der Silberphase verteilt, wodurch die allgemeine Druck- und Verschleißfestigkeit des Materials verringert wird. Optimierte Sinterprozesse, wie das heißisostatische Pressen (HIP), verdichten die Poren durch ungerichteten Druck, wodurch die Dichte deutlich verbessert und die Härte erhöht wird. Defekte wie Mikrorisse schwächen die Härte weiter. Diese Risse können durch thermische Spannung oder Abkühlungsschrumpfung verursacht werden, insbesondere an der Silber-Wolfram-Grenzfläche. Die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Härte nimmt bei hoher Defektdichte deutlich ab. Beobachtungen zeigen, dass eine Verringerung der Porosität und Defektdichte die Härte auf ein höheres Niveau steigern kann, was für Anwendungen geeignet ist, die eine hohe Verschleißfestigkeit erfordern.

Die Korrosionsbeständigkeit wird direkter durch Porosität und Defekte beeinflusst. Poren dienen als Kanäle für das Eindringen korrosiver Medien und erhöhen das Risiko von Oberflächenerosion, insbesondere in feuchten oder sauren Umgebungen, wo Restfeuchtigkeit oder Chemikalien in den Poren den Korrosionsprozess beschleunigen. Defekte wie ungebundene Grenzflächen oder Mikrorisse bieten Ausgangspunkte für Korrosion, durch die korrosive Medien eindringen und die chemische Stabilität der Legierung verringern. Die Silberphase kann in den Poren oxidieren oder sulfidieren, und obwohl die Wolframphase eine hohe Korrosionsbeständigkeit aufweist, können sich in den Defekten dennoch instabile Verbindungen bilden. Optimierte Sinterprozesse, wie beispielsweise das Funkenplasmasintern (SPS), reduzieren Porosität und Defekte, verbessern die Grenzflächenbindung und erhöhen die Korrosionsbeständigkeit deutlich. Mikrostrukturelle Untersuchungen zeigen, dass die dichte Struktur die Lebensdauer von Silber-Wolfram-Legierungen in korrosiven Umgebungen verlängert und sie daher besonders für Industrieanlagen geeignet macht. Zu den Optimierungsansätzen gehören die Reduzierung von Anfangsdefekten durch hochreine Rohstoffe oder die Verwendung von Nanopulvern zur Verbesserung der Dichte. Die Kontrolle von Porosität und Defekten wird durch die Anpassung der Prozessparameter erreicht. Der Ausgleich von Härte und Korrosionsbeständigkeit ist dabei entscheidend.

### 3.3 Mikrostrukturentwicklung der Silber-Wolfram-Legierung

Die Mikrostruktur der Silber-Wolfram-Legierung verändert sich während der Herstellung und Anwendung, abhängig vom Zusammensetzungsverhältnis, den Sinterbedingungen und Umweltfaktoren. Dieses Entwicklungsgesetz verdeutlicht den dynamischen Zusammenhang zwischen Struktur und Leistung und bildet eine wichtige Grundlage für Prozessoptimierung und Lebensdauervorhersage. Zu den treibenden Faktoren der Mikrostrukturentwicklung zählen Phasenwechsel, Kornwachstum und Defektbildung. Die Wechselwirkung zwischen Silber und Wolfram ist dabei der zentrale Mechanismus.

#### 3.3.1 Mikrostrukturentwicklung durch Änderungen des Zusammensetzungsverhältnisses

Die Veränderung des Zusammensetzungsverhältnisses ist der Hauptfaktor für die Entwicklung der Mikrostruktur der Silber-Wolfram-Legierung. Das Verhältnis von Silber zu Wolfram beeinflusst direkt die Kornmorphologie, die Phasenverteilung und den Porositätszustand und prägt unterschiedliche mikrostrukturelle Eigenschaften. Dieser Entwicklungsprozess wird durch Sinterprozesse und Wärmebehandlung erreicht und spiegelt die dynamische Anpassung der Materialeigenschaften wider.

Mit steigendem Silbergehalt verändert sich die Mikrostruktur deutlich. Silber, eine niedrigschmelzende Bindephase, schmilzt beim Flüssigphasensintern, benetzt die Wolframpartikel und füllt die Zwischenräume, wodurch die Porosität reduziert und die Dichte erhöht wird. Die Kornmorphologie entwickelt sich zu einem netzwerkförmigen Silberphasengefüge, die Wolframpartikel sind gleichmäßiger umhüllt, und die Grenzflächenbindungskraft verbessert sich. Bei mittlerem Silbergehalt bildet die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Silberphase ein kontinuierliches Netzwerk, die Korngrenzendichte nimmt zu, die Mikrostruktur wird feiner und Härte und Zähigkeit verbessern sich. Ein zu hoher Silbergehalt kann jedoch zu einem Überschuss an Flüssigphase führen, die Silberphase akkumuliert zu größeren Körnern, die Porosität wird reduziert, die Korngrenzen werden jedoch zu weich, was die Stabilität beeinträchtigt. Beobachtungen zeigen, dass die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit von Legierungen mit hohem Silberanteil verbessert werden, die Verschleißfestigkeit jedoch abnehmen kann.

Mit steigendem Wolframgehalt entwickelt sich die Mikrostruktur zu einer von Wolframpartikeln dominierten Skelettstruktur. Wolfram verbleibt im festen Zustand als Verstärkungsphase mit hohem Schmelzpunkt, die Korngröße nimmt zu, die Silberphasenverteilung nimmt ab und die Fähigkeit, Lücken zu füllen, nimmt ab. Die Porosität kann zunehmen, insbesondere wenn die flüssige Silberphase nicht ausreicht, Mikrorisse und ungebundene Grenzflächen zunehmen und die Dichte abnimmt. Der korngrenzenverstärkende Effekt lässt nach, die Härte nimmt zu, die Zähigkeit jedoch ab. Mit abnehmender Silberphase nehmen auch die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit ab. Durch optimierte Sinterprozesse wie heißisostatisches Pressen können Poren verdichtet und die Strukturkonsistenz verbessert werden. Legierungen mit einem hohen Wolframanteil eignen sich für Anwendungen mit hohen Temperaturen und Lichtbogenfestigkeit.

Änderungen des Zusammensetzungsverhältnisses wirken sich auch auf die Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung aus. Ein Ungleichgewicht im Silber-Wolfram-Verhältnis kann zur Sedimentation von Wolframpartikeln oder zur lokalen Ansammlung von Silberphasen, erhöhter mikrostruktureller Heterogenität und verminderter Leistungskonsistenz führen. Die Gleichmäßigkeit der Pulvermischung und die Kontrolle der Sinteratmosphäre können diesen Effekt reduzieren und die Stabilität der Phasenverteilung aufrechterhalten. Der Wärmebehandlungsprozess treibt die Entwicklung zusätzlich voran. Hohe Temperaturen und eine Langzeitbehandlung können zu Kornwachstum und Phasenumlagerung führen, und die Parameter müssen kontrolliert werden, um eine übermäßige Entwicklung zu vermeiden. Beobachtungsergebnisse zeigen, dass die dynamische Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses eine Leistungsoptimierung durch mikrostrukturelle Entwicklung erreicht, die für unterschiedliche Anwendungsanforderungen geeignet ist. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verfeinerung von Körnern durch nanoskalige Pulver oder die Anpassung lokaler Komponentenverhältnisse mittels funktionalem Gradientendesign. Die mikrostrukturelle Entwicklung durch veränderte Komponentenverhältnisse verdeutlicht die Anpassungsfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen und bildet die Grundlage für die Verfeinerung des Herstellungsprozesses.

### 3.3.2 Gefügeumwandlung während der Wärmebehandlung

Der Wärmebehandlungsprozess ist ein wichtiger Schritt in der Entwicklung der Mikrostruktur einer Silber-Wolfram-Legierung. Er beeinflusst die Leistungsfähigkeit der Legierung maßgeblich, indem er Temperatur und Zeit kontrolliert, um Kornwachstum, Phasenanpassung und Defektreduzierung zu induzieren. Die Wärmebehandlung umfasst Glühen, Abschrecken und Altern. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Silber und Wolfram reagieren in diesem Prozess unterschiedlich und prägen neue mikrostrukturelle Eigenschaften. Während des Glühprozesses verändert sich die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mikrostruktur der Silber-Wolfram-Legierung deutlich. Das Glühen bei niedrigeren Temperaturen fördert die Umverteilung der Silberphase, und die flüssige Phase füllt die verbleibenden Poren, wodurch die Grenzflächenbindungskraft erhöht wird. Die Wolframpartikel bleiben fest, die Korngrenzen tendenziell glatt, und Mikrorisse und Defekte nehmen allmählich ab. Die Korngröße kann leicht zunehmen, übermäßiges Wachstum kann jedoch durch die Steuerung der Glühzeit zur Erhaltung einer feinen Struktur unterdrückt werden. Beobachtungen zeigen, dass die Dichte der geglühten Legierung verbessert wird und sich Härte und Leitfähigkeit bis zu einem gewissen Grad verbessern, was sich besonders für Kontaktanwendungen eignet, die eine gleichmäßige Leistung erfordern.

Die Abschreckbehandlung induziert Phasenänderungen durch schnelles Abkühlen. Die Silberphase bildet durch die schnelle Erstarrung feine Körner, und die Wolframpartikel sind gleichmäßiger verteilt. Abkühlspannungen können jedoch Mikrorisse verursachen. Der Phasenverteilungszustand wird angepasst, und das Silberphasennetzwerk kann brechen oder sich neu anordnen, was die Wärme- und elektrische Leitfähigkeit beeinträchtigt. Defekte wie ungebundene Grenzflächen können durch Spannungskonzentration zunehmen, und die Abkühlgeschwindigkeit muss optimiert werden, um diesen Effekt zu reduzieren. Die Mikrostruktur nach dem Abschrecken eignet sich für Teile, die hohe Festigkeit und schnelle Reaktion erfordern, die Zähigkeit kann jedoch leicht reduziert sein.

Die Alterungsbehandlung optimiert die Mikrostruktur durch langfristige Niedertemperaturbehandlung. Die Silberphase stabilisiert sich allmählich, die Grenzfläche der benetzten Wolframpartikel wird verbessert und die Porosität weiter reduziert. Das Kornwachstum wird gehemmt, die Wolframskelettstruktur verdichtet sich und die Defektdichte wird deutlich reduziert. Die Phasenanpassung erhöht die Grenzflächenbindungsstärke von Silber und Wolfram und verbessert Härte und Korrosionsbeständigkeit. Beobachtungsergebnisse zeigen, dass die gealterte Legierung im Langzeiteinsatz eine gute Leistung erbringt und sich insbesondere für Gegengewichte und Schweißelektroden in der Luft- und Raumfahrt eignet. Die genaue Kontrolle der Wärmebehandlungsparameter ist entscheidend. Übermäßige Temperaturen oder zu lange Behandlungszeiten können zu übermäßiger Korngröße führen und die Leistung beeinträchtigen. Optimierungsansätze umfassen die Steuerung von Phasenübergängen durch segmentierte Wärmebehandlung oder die Echtzeit-Parameteranpassung in Kombination mit intelligenter Überwachungstechnologie. Die mikrostrukturelle Transformation während der Wärmebehandlung wird dynamisch durch die Fließfähigkeit des Silbers und die Stabilität des Wolframs optimiert, was die Gesamtleistung der Legierung beeinflusst.

### 3.3.3 Einfluss der Betriebsumgebung auf Mikrostruktur und Leistungsrückmeldung

Die Einsatzumgebung hat einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklung der Mikrostruktur von Silber-Wolfram-Legierungen. Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit, chemische Medien und mechanische Belastung verändern die Struktureigenschaften durch physikalische und chemische Effekte, was sich wiederum auf die Leistung der Legierung auswirkt. Dieser Einfluss bildet eine wichtige Grundlage für Lebensdauervorhersagen und Wartungsstrategien. Hohe Temperaturen beschleunigen die mikrostrukturelle Entwicklung der Silber-Wolfram-Legierung. Die Silberphase kann bei hohen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Temperaturen erweichen oder teilweise schmelzen, die Grenzfläche benetzter Wolframpartikel kann sich neu anordnen, und aufgrund thermischer Spannung können Mikrorisse an den Korngrenzen entstehen. Die Wolframskelettstruktur bleibt stabil, doch langfristige hohe Temperaturen können zu Kornwachstum, erhöhter Porosität und verringerter Dichte führen. Leistungsrückwirkungen äußern sich in verringerter elektrischer und thermischer Leitfähigkeit, verringerter Härte durch Veränderungen der Korngrenzen und verringerter Korrosionsbeständigkeit durch thermische Oxidation. Hochtemperaturkomponenten müssen zum Schutz verstärkt werden.

Die Auswirkungen feuchter oder korrosiver Umgebungen auf die Mikrostruktur sind komplexer. Die Silberphase kann in schwefel- oder chloridhaltiger Umgebung leicht korrodieren und Oxide oder Sulfide sowie Defekte an der Grenzfläche bilden. Die Wolframphase ist stark korrosionsbeständig, doch können Defekte in das korrosive Medium eindringen, die Porosität nimmt zu und die strukturelle Integrität wird beschädigt. Leistungsrückwirkungen äußern sich in verringerter Leitfähigkeit, weiterer Schwächung der Korrosionsbeständigkeit und einer durch Rissausbreitung möglicherweise verringerten mechanischen Festigkeit, die durch Oberflächenbeschichtung oder Dichtungsdesign verbessert werden muss. Mechanische Belastungen wie Vibrationen oder Stöße führen zu dynamischen Veränderungen der Mikrostruktur. Korngrenzen unterliegen Spannungskonzentrationen, Mikrorisse können sich ausdehnen, und die Poren werden zu Spannungsentlastungspunkten, was die Dichte beeinflusst. Die Duktilität der Silberphase absorbiert einen Teil der Spannung, langfristige Belastung kann jedoch zu Ermüdungsschäden führen. Leistungsrückwirkungen äußern sich in verringerter Zähigkeit, lokaler Härteabschwächung und eingeschränkter elektrischer und thermischer Leitfähigkeit aufgrund mikrostruktureller Schäden. Für dynamische Anwendungen ist eine Optimierung der Kornverteilung erforderlich.

Die kombinierten Auswirkungen von Umweltfaktoren beeinflussen die Leistung durch mikrostrukturelle Entwicklung. Beobachtungen zeigen, dass hohe Temperaturen und Korrosion zusammenwirken und das Defektwachstum beschleunigen, während mechanische Belastungen die Rissausbreitung verstärken. Optimierungsansätze umfassen die Entwicklung umweltbeständiger Beschichtungen oder die Verbesserung der lokalen Stabilität durch funktionales Gradientendesign. Der Einfluss der Betriebsumgebung auf die Mikrostruktur und deren Leistungsrückwirkung liefern wichtige Hinweise für die adaptive Legierungsentwicklung.

### 3.4 Methoden zur Steuerung der Mikrostruktur von Silber-Wolfram-Legierungen

Die Regulierung der Mikrostruktur von Silber-Wolfram-Legierungen ist der Schlüssel zur Leistungssteigerung und Anpassung an Anwendungsanforderungen. Dies geschieht durch eine Kombination aus Materialaufbereitung, Prozessoptimierung und Nachbearbeitung. Die Regulierung misst Kornmorphologie, Phasenverteilung, Porosität und Defekte und zielt auf die Optimierung von elektrischer Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Härte und Korrosionsbeständigkeit ab. Die Rohstoffauswahl bildet die Grundlage der Regulierung. Hochreines nanoskaliges Wolframpulver und Silberpulver werden verwendet, um die Körner zu verfeinern und die Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung zu verbessern. Pulvermischverfahren wie das Hochenergie-Kugelmahlen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gewährleisten einheitliche Rohstoffe und reduzieren anfängliche Defekte. Dies bildet die Grundlage für die nachfolgende Regulierung.

Der Sinterprozess ist der Kern der Regelung. Flüssigphasensintern füllt Lücken und reduziert Porosität durch die Benetzungswirkung von Silber. Funkenplasmasintern (SPS) hemmt das Kornwachstum und optimiert die Phasenverteilung durch schnelles Erhitzen und Druckbeaufschlagung. Heißisostatisches Pressen (HIP) verdichtet Defekte und erhöht die Dichte durch hohen Druck. Sinteratmosphären wie Vakuum oder Schutzgas reduzieren oxidierte Verunreinigungen und verbessern die Grenzflächenqualität. Wärmebehandlung sorgt für dynamische Regelung. Glühen verbessert die Grenzflächenbindung, Abschrecken verfeinert die Körner, und Alterungsbehandlung stabilisiert den Phasenzustand und gleicht Korngrenzen und Defektzustände aus. Parameteroptimierungen wie stufenweise Temperaturerhöhungen steuern das Kornwachstum und verbessern die Leistungskonsistenz. Oberflächenbehandlungen verbessern die Regelung. Elektrochemisches Polieren reduziert Rauheit und reduziert Defektbildungspunkte. Korrosionsschutzbeschichtungen wie Titannitrid-Isolationsmedien und Antihafbeschichtungen verbessern die Oberflächeneigenschaften. Funktionales Gradientendesign passt die Zusammensetzung bereichsweise an, um die lokale Leistung zu optimieren. Umweltmanagement unterstützt die Regelung. Kontrollieren Sie Temperatur und Luftfeuchtigkeit während des Gebrauchs, um Korrosionseffekte zu reduzieren. Intelligente Überwachungstechnologie passt Prozessparameter in Echtzeit an und optimiert dynamisch die Mikrostruktur. Der umfassende Einsatz von Kontrollmaßnahmen verbessert die Leistung der Silber-Wolfram-Legierung, um den Anforderungen der Elektro-, Schweiß- und Luft- und Raumfahrtindustrie gerecht zu werden.

#### 3.4.1 Methode zur Kontrolle der Mikrostruktur basierend auf dem Herstellungsprozess

Die auf dem Herstellungsprozess basierende Methode zur Kontrolle der Mikrostruktur ist das wichtigste Mittel zur Optimierung der Leistung von Silber-Wolfram-Legierungen. Die präzise Kontrolle der Kornmorphologie, Phasenverteilung und Defekte wird durch verschiedene Stufen des Pulvermetallurgieprozesses erreicht. Der Herstellungsprozess umfasst Pulvermischen, Pressen, Sintern und Nachbearbeitung, und jeder Schritt hat eine einzigartige Wirkung auf die Mikrostruktur. Die gleichmäßige Dispersion der Rohstoffe wird in der Pulvermischphase durch eine Hochenergie-Kugelmahltechnologie erreicht. Nanoskaliges Wolframpulver und Silberpulver werden verwendet, um die Körner zu verfeinern und die Konsistenz der Phasenverteilung zu optimieren. Hochreine Rohstoffe verringern Verunreinigungen und die anfängliche Defektrate und legen damit den Grundstein für die nachfolgende Regulierung. Der Pressvorgang passt die Partikelanordnung an, indem er den Druck und das Formdesign kontrolliert, die Lücken verringert und das primäre Dichteniveau verbessert.

Der Sinterprozess ist ein zentrales Element der Regelung. Beim Flüssigphasensintern wird der niedrige Schmelzpunkt von Silber genutzt, um Wolframpartikel zu benetzen, Lücken zu füllen und Porosität zu reduzieren. Funkenplasmasintern (SPS) hemmt das Kornwachstum, verfeinert die Struktur und optimiert die Phasenverteilung durch gepulsten Strom und schnelles Erhitzen. Heißisostatisches Pressen komprimiert Defekte durch omnidirektionalen Hochdruck, verbessert die Grenzflächenbindung und erhöht die Dichte deutlich. Sinteratmosphären wie Vakuum oder Inertgas reduzieren die Oxidation,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

erhalten die Reinheit von Wolfram und Silber und verbessern die Qualität der Mikrostruktur. Nachbehandlungen optimieren die Struktur zusätzlich. Wärmebehandlungen wie Glühen verbessern die Grenzflächenbindung, Abschrecken verfeinert die Körner und Alterungsbehandlungen stabilisieren den Phasenzustand. Oberflächenbehandlungen wie elektrochemisches Polieren reduzieren Rauheit und reduzieren Defektanfänge. Durch die Feineinstellung von Prozessparametern wie Temperaturgradient und Zeitsteuerung wird die Mikrostruktur an unterschiedliche Anwendungsanforderungen angepasst. Beobachtungen zeigen, dass der Prozessverlauf von SPS in Kombination mit HIP die Dichte und Gleichmäßigkeit deutlich verbessert und für Hochleistungskontakte geeignet ist.

### 3.4.2 Optimierung der Mikrostruktur durch Legierungselementzugabe

Die Zugabe von Legierungselementen ist ein wichtiges Mittel zur Optimierung der Mikrostruktur von Silber-Wolfram-Legierungen. Durch die Zugabe von Spurenelementen zur Anpassung des Phasenzustands, der Korngrenzen und des Defektzustands werden die elektrische Leitfähigkeit, die Wärmeleitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften verbessert. Art und Gehalt der zugesetzten Elemente müssen entsprechend der angestrebten Leistung präzise kontrolliert werden, um negative Auswirkungen zu vermeiden.

Die Zugabe von Nickel verbessert die Mikrostruktur der Silber-Wolfram-Legierung. Eine geringe Menge Nickel (meist weniger als einige Prozent) erhöht die Benetzungsfähigkeit der Silberphase, fördert das Flüssigphasensintern, füllt Poren und reduziert die Defektdichte. Nickel verbessert zudem die Grenzflächenbindung, verfeinert die Körner und erhöht Härte und Zähigkeit. Übermäßige Mengen können jedoch Magnetismus erzeugen und die Leitfähigkeit beeinträchtigen. Beobachtungen zeigen, dass die durch Nickel optimierte Grenzfläche der Legierung dichter ist und sich für Anwendungen eignet, die hohe Festigkeit erfordern. Die Zugabe von Kobalt optimiert die Phasenverteilung. Kobalt bildet eine stabile Grenzflächenschicht mit Silber und Wolfram, reduziert Mikrorisse und verbessert die Korngrenzenverstärkung. Kobalt verbessert zudem die Gleichmäßigkeit der Wolframpartikel, verringert die Porosität und verbessert die Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Der Kobaltgehalt muss niedrig gehalten werden, um übermäßige Verhärtung und verringerte Zähigkeit zu vermeiden. Experimente haben gezeigt, dass Legierungen mit Kobaltzusätzen in Hochtemperaturumgebungen gut funktionieren und sich für Schweißelektroden eignen. Auch andere Elemente wie Molybdän oder Chrom können die Mikrostruktur optimieren. Molybdän verbessert die Oxidationsbeständigkeit von Wolfram, reduziert Wärmebehandlungsfehler und erhöht die Korrosionsbeständigkeit. Chrom verbessert die chemische Stabilität der Silberphase, verringert die Korrosionsempfindlichkeit und optimiert die Phasenverteilung. Die Zugabemenge muss fein abgestimmt werden, um Korngrenzenversprödung oder Leistungsungleichgewichte zu vermeiden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zugabe von Spurenelementen die Körner verfeinert und die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur verbessert.

Die Wirkung von Legierungselementen wird durch den Sinterprozess verstärkt. Hochtemperaturbehandlung fördert die Elementdiffusion, optimiert die Grenzflächenbindung, und Niedertemperaturalterung stabilisiert den Phasenzustand. Der synergistische Effekt zugesetzter Elemente verbessert die Qualität der Mikrostruktur und eignet sich für spezifische Anwendungsanforderungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Optimierungsrichtungen umfassen die Entwicklung neuer Legierungselementkombinationen oder die Ermittlung des optimalen Zugabeverhältnisses durch intelligente Analyse. Die Zugabe von Legierungselementen unterstützt die Leistungssteigerung von Silber-Wolfram-Legierungen durch mikrostrukturelle Optimierung direkt.

### 3.4.3 Zusammenhang zwischen Mikrostrukturregulierung und Leistungsanpassung

Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Regulierung der Mikrostruktur und der individuellen Leistungsanpassung. Anpassungen der Kornmorphologie, der Phasenverteilung und der Defekte wirken sich direkt auf elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Härte, Korrosionsbeständigkeit und Zähigkeit aus und erfüllen so die Anforderungen unterschiedlicher Anwendungsszenarien. Dieser Zusammenhang bietet Flexibilität bei der Materialentwicklung, und optimierte Prozesse und Elementzusätze sind der Schlüssel zur individuellen Anpassung. Die Regulierung der Kornmorphologie beeinflusst die mechanischen Eigenschaften. Die Verfeinerung der Körner verbessert Härte und Festigkeit durch Korngrenzenverstärkung, was sich für hochverschleißfeste Kontakte eignet. Die Anpassung der Kornorientierung reduziert die Spannungskonzentration und erhöht die Zähigkeit, was sich für Umgebungen mit dynamischer Belastung eignet. Beobachtungen zeigen, dass Legierungen mit nanoskaligen Körnern in Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt gute Ergebnisse erzielen. Die Optimierung der Phasenverteilung bestimmt die elektrischen Eigenschaften. Die Kontinuität des Silberphasennetzwerks verbessert die elektrische und thermische Leitfähigkeit, was sich für Hochspannungsschalterkontakte eignet. Die gleichmäßige Verteilung der Wolframphasen erhöht die strukturelle Stabilität und gleicht das Hochtemperaturverhalten aus, was sich für Schweißelektroden eignet. Das funktionale Gradientendesign fügt dem leitfähigen Bereich Silberphasen hinzu, um den Wärmeableitungsanforderungen der Elektronik anzupassen.

Die Kontrolle von Defekten und Porosität verbessert die Gesamtleistung. Die Reduzierung der Porosität erhöht die Dichte, verbessert die Korrosionsbeständigkeit und Leitfähigkeit und eignet sich für Industrieanlagen. Die Reduzierung von Mikrorissen verbessert die Ermüdungsbeständigkeit und erfüllt die Anforderungen an den Langzeitbetrieb. Prozessoptimierungen wie die Kombination von HIP und SPS ermöglichen defektarme Strukturen und maßgeschneiderte, hochzuverlässige Komponenten.

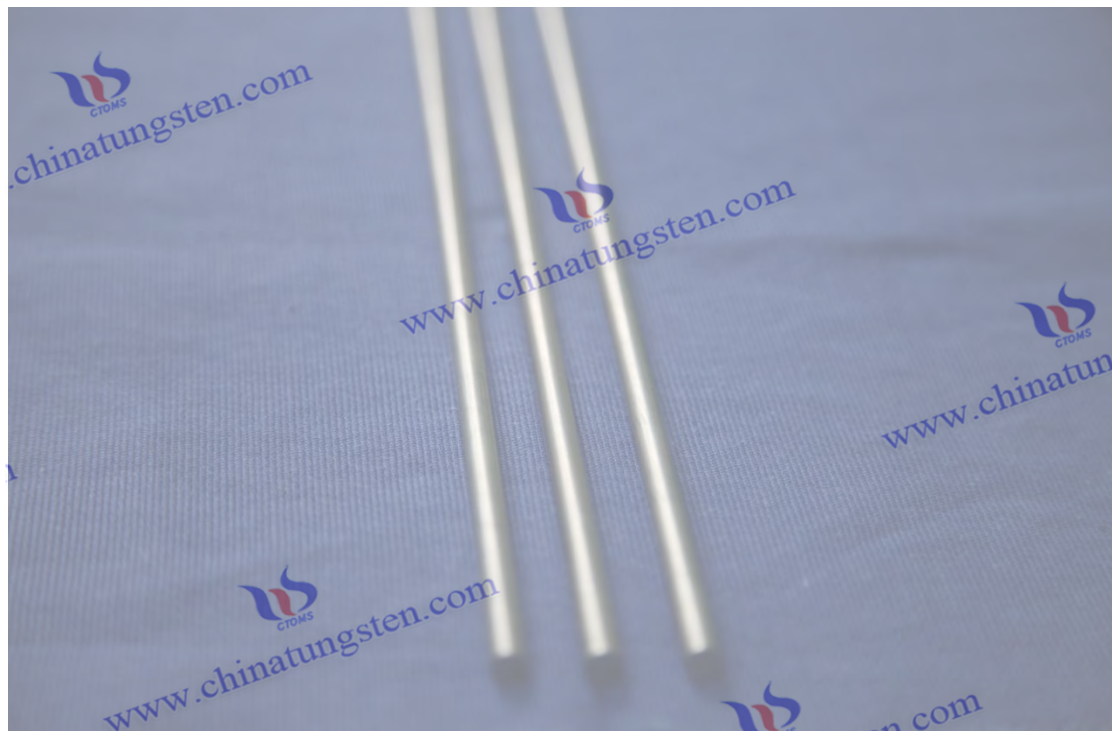
Zusätze von Legierungselementen unterstützen die individuelle Anpassung zusätzlich. Nickel und Kobalt verfeinern Korngrenzen, erhöhen Härte und Korrosionsbeständigkeit und passen verschleißfeste Anwendungen an. Molybdän und Chrom optimieren die Oxidationsbeständigkeit, um den Anforderungen von Hochtemperaturumgebungen gerecht zu werden. Durch die dynamische Anpassung der Elementverhältnisse wird die Mikrostruktur an das Anwendungsszenario angepasst. Beobachtungen zeigen, dass maßgeschneiderte Legierungen in bestimmten Eigenschaften allgemeine Werkstoffe übertreffen.

Zu den Optimierungsansätzen gehören die Entwicklung intelligenter Designtools zur Vorhersage der Regulierungswirkung oder die Verifizierung kundenspezifischer Lösungen durch Multiparameter-Experimente. Die Verbindung zwischen Mikrostrukturregulierung und Leistungsanpassung ermöglicht

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



die adaptive Unterstützung von Silber-Wolfram-Legierungen, um den vielfältigen Anforderungen der Elektro-, Schweiß- und Luft- und Raumfahrtbranche gerecht zu werden.



CTIA GROUP LTD Silber-Wolfram-Legierung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD  
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](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [silver-tungsten.net](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

## Kapitel 4: Herstellungstechnologie der Silber-Wolfram-Legierung

Der Herstellungsprozess der Silber-Wolfram-Legierung ist entscheidend für ihre Mikrostruktur und Leistung. Die Pulvermetallurgie ist die wichtigste Produktionstechnologie, die die Herstellung von Hochleistungslegierungen durch präzise Steuerung der Rohstoffverarbeitung, des Formgebungs- und Sinterprozesses ermöglicht. Dieses Verfahren kombiniert die hohe Leitfähigkeit von Silber mit der hohen Härte von Wolfram, um die Anwendungsanforderungen von elektrischen Kontakten, Schweißelektroden und Luft- und Raumfahrtkomponenten zu erfüllen.

### 4.1 Herstellung einer Silber-Wolfram-Legierung durch Pulvermetallurgie

Die Pulvermetallurgie ist ein effizientes und kontrollierbares Produktionsverfahren zur Herstellung von Silber-Wolfram-Legierungen durch Mischen, Pressen und Sintern von Silber- und Wolframpulver. Dieses Verfahren nutzt den niedrigen Schmelzpunkt von Silber und den hohen Schmelzpunkt von Wolfram optimal aus, um durch Flüssigphasensintern eine dichte Struktur zu bilden. Der Prozess umfasst Pulveraufbereitung, Mischen, Pressen und Sintern. Anschließende Wärme- und Oberflächenbehandlung optimieren die Leistung zusätzlich. Die Pulvermetallurgie eignet sich für die Massenproduktion, insbesondere für Anwendungen, die hohe Dichte und Gleichmäßigkeit erfordern.

#### 4.1.1 Pulveraufbereitungsprozess und wichtige Punkte

Die Pulveraufbereitung ist die Grundlage der Pulvermetallurgie. Sie umfasst die Gewinnung, Reinigung und Partikelgrößenkontrolle von Silber- und Wolframpulvern, die sich direkt auf die Mikrostruktur und die Eigenschaften der Legierung auswirken. Der Prozess umfasst die Rohstoffauswahl, das Zerkleinern, Sieben und die Oberflächenbehandlung. Jeder Schritt erfordert die Beachtung wichtiger Punkte.

Bei der Rohstoffauswahl wird zunächst auf die hohe Reinheit von Silber und Wolfram geachtet. Hochwertiges Metallpulver wird verwendet, um Verunreinigungen zu reduzieren. Silberpulver wird üblicherweise durch chemische Fällung oder Zerstäubung hergestellt, Wolframpulver hingegen wird durch Wasserstoffreduktion aus Wolframoxid gewonnen, um eine stabile chemische Zusammensetzung zu gewährleisten. Je höher die Reinheit, desto besser sind die Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit der hergestellten Legierung.

Die Pulverpartikelgröße wird durch Kugelmahlen oder Luftstrommahlen verfeinert. Wolframpulver muss von groben Partikeln auf Submikrometer- oder Nanometergröße zerkleinert werden, und Silberpulver muss für das anschließende Mischen auf eine geeignete Partikelgröße gebracht werden. Hochenergetische Kugelmahltechnologie kann die Gleichmäßigkeit verbessern, Überhitzung sollte jedoch vermieden werden, da dies zu einer Pulveragglomeration führen kann. Die Kontrolle der Partikelgrößenverteilung ist entscheidend. Zu große Partikel können Poren verursachen, zu kleine Partikel erhöhen die Oberflächenenergie und beeinträchtigen das Sinterverhalten. Der Siebschritt gewährleistet die Konsistenz der Pulverpartikelgröße. Standardsiebe werden verwendet, um über- oder untergroße Partikel zu entfernen und so den Mischeffekt zu optimieren. Die Gleichmäßigkeit der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Partikelgröße wirkt sich direkt auf die Phasenverteilung aus. Feine Partikel tragen zur Bildung einer dichten Struktur bei, die Fließfähigkeit muss jedoch für die Kompression ausgeglichen sein. Durch die Oberflächenbehandlung werden Oxidschichten und Verunreinigungen durch chemische Reinigung oder Beschichtung entfernt, um die Kompressibilität und Sintereigenschaften des Pulvers zu verbessern. Auf der Oberfläche von Silberpulver kann sich Silberoxid bilden, das mit einem Reduktionsmittel behandelt werden muss. Das Oxid auf der Oberfläche von Wolframpulver wird durch Säurewäsche entfernt. Das behandelte Pulver sollte trocken gelagert werden, um Feuchtigkeitsaufnahme oder Oxidation zu vermeiden.

Zu den wichtigsten Punkten gehören die Kontrolle der Pulverreinheit, der Partikelgröße und der Oberflächenbeschaffenheit sowie der Einsatz moderner Geräte wie Plasma-Kugelmöhlen zur Verbesserung der Effizienz. Die Optimierung der Pulveraufbereitung legt den Grundstein für nachfolgende Prozesse und steht in direktem Zusammenhang mit der mikrostrukturellen Qualität der Legierung.

#### 4.1.2 Prinzip und Funktionsweise des Pressvorgangs

Der Pressvorgang ist der wichtigste Schritt bei der Formung eines Grünkörpers aus dem gemischten Silber-Wolfram-Pulver. Er basiert auf dem Prinzip der Kompression und Verdichtung von Pulverpartikeln unter Druck, was sich direkt auf die Dichte des Grünkörpers und den anschließenden Sintereffekt auswirkt. Um die Formqualität sicherzustellen, müssen Druckkontrolle, Formgestaltung und Prozessparameter im Mittelpunkt des Vorgangs stehen. Das Pressprinzip basiert auf der plastischen Verformung und dem Gleiten der Pulverpartikel unter äußerem Druck, wodurch die molekularen Lücken gefüllt und die Porosität reduziert werden. Silberpulver lässt sich aufgrund seiner guten Duktilität leicht komprimieren, während Wolframpulver aufgrund seiner großen Härte einen höheren Druck erfordert. Das gemischte Pulver wird in der Form einer Kraft ausgesetzt, die Partikel werden neu angeordnet und die ursprüngliche Dichte wird schrittweise verbessert. Die Gleichmäßigkeit der Druckverteilung ist entscheidend. Lokaler Überdruck kann Risse verursachen, während Unterdruck mehr Poren erhält.

Der Vorgang umfasst das Einfüllen des Pulvers, das Vorpressen und das Hauptpressen. Achten Sie beim Einfüllen des Pulvers darauf, dass es die Form gleichmäßig füllt, um Schichtung oder Hohlräume zu vermeiden. Vibration oder Klopfen können die Verteilung unterstützen. Beim Vorpressen wird niedriger Druck angewendet, um Luft zu entfernen und den Partikelkontakt zu verbessern. Das Hauptpressen erfolgt mit einer hydraulischen oder mechanischen Presse. Der Druck wird entsprechend der Legierungszusammensetzung angepasst. Bei hohem Wolframgehalt muss er erhöht werden. Der typische Wert liegt bei mehreren hundert MPa. Die Presszeit wird von wenigen Sekunden bis zu mehreren zehn Sekunden gesteuert. Ist sie zu lang, kann es zu einem elastischen Rückprall kommen.

Das Formendesign ist entscheidend für den Betrieb. Verwenden Sie verschleißfeste Materialien wie Hartmetall, um Formen mit glatten Innenwänden herzustellen und so die Reibung zu reduzieren. Die Form wird an die Anforderungen des Endteils angepasst, und komplexe Formen müssen abschnittsweise gepresst werden. Schmiermittel wie Zinkstearat werden auf die Innenwand der Form aufgetragen, um

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



die Reibung zu reduzieren, die Rohlingsdichte zu verbessern und die Entformungseigenschaften zu verbessern .

Die Optimierung der Prozessparameter umfasst Druckgradient, Pressgeschwindigkeit und Temperatur. Allmählicher Druckaufbau reduziert die Spannungskonzentration, langsames Pressen verbessert die Dichte und moderates Erhitzen verbessert die Pulverfließfähigkeit. Beobachtungen zeigen, dass der Grünkörper mit optimiertem Pressprozess eine geringere Porosität und eine verbesserte Oberflächenebenheit aufweist und so eine gute Grundlage für das Sintern bildet. Zu den Optimierungsansätzen gehören die Entwicklung eines intelligenten Presssystems zur Echtzeitüberwachung des Drucks oder der Einsatz isostatischer Presstechnologie zur Verbesserung der Gleichmäßigkeit. Das Prinzip und die Funktionsweise des Pressprozesses ermöglichen durch präzise Steuerung hochwertige Rohlinge, was die Leistung der Silber-Wolfram-Legierung direkt unterstützt.

#### 4.1.3 Steuerung und Einflussnahme des Sinterprozesses

Der Sinterprozess ist ein wichtiger Schritt bei der pulvermetallurgischen Herstellung von Silber-Wolfram-Legierungen. Die Bindung und Verdichtung der Pulverpartikel erfolgt durch Hochtemperaturbehandlung, die sich direkt auf die Mikrostruktur und die Leistung auswirkt. Die Kontrolle von Sintertemperatur, -zeit und -atmosphäre ist entscheidend. Die Optimierung der Prozessparameter hängt eng mit der Porosität, der Phasenverteilung und den mechanischen Eigenschaften der Legierung zusammen.

Der Sinterprozess basiert auf dem Prinzip des Flüssigphasensinterns. Silber schmilzt bei hohen Temperaturen, benetzt die Wolframpartikel, füllt die Zwischenräume und verbessert die Grenzflächenhaftung. Die Temperaturkontrolle ist entscheidend. Bei zu niedriger Temperatur schmilzt das Silber nicht vollständig, und die Porosität ist hoch. Bei zu hoher Temperatur können die Wolframpartikel wachsen oder das Silber verflüchtigen, was die Gleichmäßigkeit beeinträchtigt. Die typische Sintertemperatur richtet sich nach dem Silber-Wolfram-Verhältnis, liegt in der Regel etwas über dem Schmelzpunkt von Silber und wird für eine gewisse Zeit beibehalten, um die Diffusion zu fördern. Die Zeitsteuerung beeinflusst Kornwachstum und Verdichtung. Kurzzeitiges Sintern begrenzt das Kornwachstum und erhält eine feine Struktur, kann aber Poren hinterlassen; Langzeitsintern fördert die Partikelbindung und reduziert Defekte, kann aber zu abnormalem Wachstum führen. Die Optimierung der Zeit erfordert ein Gleichgewicht zwischen Dichte und Korngröße. Beobachtungen zeigen, dass mittelfristiges Sintern die beste Mikrostruktur erzielt.

Die Kontrolle der Atmosphäre verhindert Oxidation und das Eindringen von Verunreinigungen. Ein Vakuum oder eine hochreine Cyanidumgebung reduziert die Oberflächenoxidation von Silber und Wolfram und erhält deren Reinheit. Inerte Atmosphären wie Argon verhindern zudem, dass chemische Reaktionen die Phasenverteilung beeinflussen. Die Stabilität der Sinteratmosphäre wirkt sich direkt auf Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit aus, daher ist die Kontrolle der Reinheit der Atmosphäre ein wichtiger Schritt. Der Einfluss des Sinterprozesses spiegelt sich in der Mikrostruktur wider. Geeignete Parameter bilden eine dichte Struktur, reduzieren die Porosität und erhöhen Härte und Leitfähigkeit.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ungeeignete Parameter können Mikrorisse oder eine ungleichmäßige Phasenverteilung verursachen und so die Leistung mindern. Heißisostatisches Pressen (HIP) oder Funkenplasmasintern (SPS) werden als Hilfsmittel eingesetzt, um den Sintereffekt weiter zu optimieren. SPS beschleunigt die Diffusion durch gepulsten Strom, und HIP komprimiert Defekte durch hohen Druck. Optimierungsrichtungen umfassen die Entwicklung intelligenter Sinteröfen zur Echtzeitüberwachung von Temperatur und Atmosphäre oder die Kombination mehrstufiger Sinterverfahren zur Verbesserung der Steuerungsgenauigkeit. Die Steuerung und der Einfluss des Sinterprozesses beeinflussen die Leistung der Silber-Wolfram-Legierung durch Parameteroptimierung direkt.

## 4.2 Herstellung einer Silber-Wolfram-Legierung durch Vakuuminfiltration

geschmolzen und in ein poröses Wolframskelett infiltriert. Dieses Verfahren eignet sich zur Herstellung komplexer Formen oder Hochleistungskomponenten und ist besonders für Anwendungen geeignet, die hervorragende Leitfähigkeit und hohe Temperaturbeständigkeit erfordern. Der Prozess umfasst die Herstellung des Wolframskeletts, die Infiltration und die Nachbearbeitung. Die präzise Steuerung der Ausrüstung und der Parameter ist der Schlüssel zum Erfolg.

### 4.2.1 Infiltrationsprinzip und Ausrüstungsanforderungen

Das Infiltrationsprinzip basiert auf Kapillarkwirkung und dem Eindringen von flüssigem Metall in eine Vakuumumgebung. Das poröse Wolframskelett wird durch das Schmelzen von Silber infiltriert, wodurch eine dichte Legierung entsteht. Silber verflüssigt sich bei hohen Temperaturen, reduziert die Oxidation unter Vakuumbedingungen und nutzt die Kapillarkraft, um in die Poren des Wolframskeletts einzudringen, die Lücken zu füllen und sich mit Wolfram zu verbinden.

Die Kapillarkwirkung ist der Kernmechanismus, und die Porengröße und -verteilung des Wolframskeletts bestimmen die Penetrationseffizienz. Die Benetzbarkeit der Silberflüssigkeit beeinflusst direkt die Eindringtiefe, und die Oberflächenspannung muss den Poreneigenschaften entsprechen. Die Vakuumumgebung reduziert die Gasverstopfung, verhindert die Oxidation oder Verflüchtigung von Silber und gewährleistet eine reine Penetration.

Zu den Ausrüstungsanforderungen gehören ein Vakuumofen, ein Heizsystem und ein Druckregler. Der Vakuumofen muss ein hohes Vakuum erreichen, um zu verhindern, dass Restgase die Penetration beeinträchtigen, und mit einem präzisen Drucksensor ausgestattet sein. Das Heizsystem nutzt Induktions- oder Widerstandsheizung mit hoher Temperaturgleichmäßigkeit und einem Regelbereich oberhalb des Silberschmelzpunkts. Der Druckregler unterstützt die Penetration und reguliert den Außendruck, um den Fluss des flüssigen Silbers zu verbessern.

Das Formdesign unterstützt komplexe Formen, besteht aus hochtemperaturbeständigen Materialien wie Graphit oder Keramik und hat eine glatte Innenwand zur Reduzierung der Anhaftung. Das Temperatur- und Vakuumüberwachungssystem passt die Parameter in Echtzeit an, um eine stabile Penetration zu

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gewährleisten. Die Wartung der Geräte ist entscheidend. Regelmäßige Inspektionen der Dichtungs- und Heizelemente sind erforderlich, um Leckagen oder Leistungseinbußen zu vermeiden.

#### 4.2.2 Prozessschritte und Parameteroptimierung

Die Prozessschritte der Vakuuminfiltration umfassen die Wolframskelettherstellung, das Silberschmelzen und die Infiltrationsnachbehandlung. Um die beste Mikrostruktur und Leistung zu erzielen, müssen die Parameter in jeder Phase optimiert werden. Das Wolframskelett wird durch Pulverpressen und Sintern hergestellt, um eine poröse Struktur zu bilden. Nach dem Mischen des Wolframpulvers wird es in Form gepresst. Die Sintertemperatur liegt unter dem Schmelzpunkt von Silber, um eine moderate Porosität zu gewährleisten. Porengröße und -verteilung müssen gleichmäßig sein. Zu große Poren können zu einer unzureichenden Silberpenetration führen, während zu kleine Poren den Fluss behindern. Beobachtungen zeigen, dass das Wolframskelett mit optimiertem Sintern die beste Penetrationswirkung aufweist.

Das Silberschmelzen erfolgt in einem Vakuumofen. Silber wird über das Wolframskelett gegeben und über den Schmelzpunkt erhitzt, um flüssiges Silber zu bilden. Durch Temperaturkontrolle soll eine Überhitzung vermieden werden, die zur Verflüchtigung des Silbers oder zu einer Verformung des Wolframskeletts führen kann. Der Vakuumgrad wird auf einem hohen Niveau gehalten, um oxidierte Verunreinigungen zu reduzieren und die Benetzbarkeit zu verbessern. Die Schmelzzeit wird an die Dicke des Skeletts angepasst, um eine vollständige Verflüssigung sicherzustellen. Der Eindringvorgang beruht auf Kapillarkraft und Hilfsdruck. Das flüssige Silber dringt unter Vakuumbedingungen in das Wolframskelett ein, und Zeit und Druck müssen aufeinander abgestimmt sein. Bei zu kurzer Eindringzeit können Poren entstehen, bei zu langer Eindringzeit läuft das Silber über. Der Hilfsdruck erhöht die Eindringtiefe, und das überschüssige Silber wird vor der Optimierungsnachbearbeitung entfernt. Beobachtungen zeigen, dass die Eindringsschicht nach der Parameteroptimierung gleichmäßig und dicht ist. Die Nachbearbeitung umfasst Abkühlung und Wärmebehandlung. Langsames Abkühlen reduziert thermische Spannungen, und Wärmebehandlungen wie Glühen verbessern die Grenzflächenhaftung und erhöhen die Leistungskonsistenz. Die Parameteroptimierung muss an die Komponentenanforderungen angepasst werden, und komplexe Formen erfordern möglicherweise eine segmentierte Infiltration.

#### 4.2.3 Vorteile und Grenzen dieses Verfahrens

Das Vakuuminfiltrationsverfahren bietet einzigartige Vorteile bei der Herstellung von Silber-Wolfram-Legierungen, unterliegt jedoch auch gewissen Einschränkungen, die sich direkt auf Anwendungsszenarien und Prozessoptimierungen auswirken. Der Vorteil liegt in der Erzielung einer hohen Dichte. Das flüssige Silber durchdringt das Wolframgerüst unter Vakuumbedingungen vollständig, wodurch die Porosität reduziert und die elektrische und thermische Leitfähigkeit der Legierung verbessert wird. Das Verfahren eignet sich besonders für Kontakte und Elektroden, die eine gleichmäßige Leistung erfordern. Ein weiterer Vorteil ist die Herstellung komplex geformter Teile. Das Infiltrationsverfahren passt sich durch Kapillarwirkung porösen Strukturen an und ermöglicht die Herstellung von Präzisionsteilen wie Gegengewichten für die Luft- und Raumfahrt oder elektronischen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Steckverbindern. Die Vakuumumgebung reduziert zudem oxidative Verunreinigungen, erhält die Reinheit von Silber und Wolfram und verbessert die Korrosionsbeständigkeit und Langzeitstabilität.

Die Einschränkungen liegen vor allem in der Komplexität des Prozesses und den hohen Kosten. Der Wartungsaufwand für Vakuumofen und Heizanlage ist hoch, und die Anfangsinvestitionen sowie die Betriebskosten steigen, was die Produktionskapazität im großen Maßstab begrenzt. Die Porosität des Wolframskeletts und die Eindringtiefe des Silbers müssen präzise aufeinander abgestimmt sein, die Parameterkontrolle ist schwierig, und die Ausfallrate kann hoch sein. Die Verflüchtigung oder das Überlaufen von Silber bei hohen Temperaturen kann zu Materialverlust führen und die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigen. Zudem stellt das Schmelzinfiltrationsverfahren hohe Anforderungen an Reinheit und Partikelgröße der Rohstoffe, und die Herstellung poröser Wolframskelette ist aufwendig, was die Handhabung erschwert. Mikrostrukturelle Untersuchungen zeigen, dass unzureichende Optimierung zu ungleichmäßigen Grenzflächen führen und die Leistungskonsistenz beeinträchtigen kann.

#### 4.3 Verfahrensvergleich und Auswahlgrundlagen

Die Herstellungsverfahren für Silber-Wolfram-Legierungen umfassen Pulvermetallurgie und Vakuuminfiltration. Jede Methode unterscheidet sich in Leistung, Kosten und Anwendbarkeit. Die Prozessauswahl muss umfassend auf Grundlage der Anwendungsanforderungen und Produktionsbedingungen getroffen werden.

##### 4.3.1 Kostenanalyse verschiedener Verfahren

Die Kosten sind eine wichtige Grundlage für die Prozessauswahl. Der Kostenunterschied zwischen Pulvermetallurgie und Vakuuminfiltration spiegelt sich hauptsächlich in den Anlageninvestitionen, dem Rohstoffverbrauch und der Produktionseffizienz wider, was sich direkt auf die Produktionswirtschaftlichkeit auswirkt. Die Kostenanalyse muss im Zusammenhang mit der Chargenproduktion und den Qualitätsanforderungen bewertet werden.

Die Anlagenkosten für die Pulvermetallurgie sind relativ gering. Pulverpresse und Sinterofen sind einfache Grundgeräte mit geringem Wartungsaufwand und eignen sich für die Massenproduktion. Als Rohstoffe werden hauptsächlich Silber- und Wolframpulver verwendet. Der Materialnutzungsgrad beim Pulvermischen und -pressen ist hoch, und der Abfall ist gering. Die Produktionseffizienz ist hoch, der Automatisierungsgrad kann durch Fließbänder verbessert werden, und die Stückkosten sinken mit steigender Produktion. Beobachtungen zeigen, dass die Kosten für die Kleinserienproduktion moderat und die Kosten für die Großserienproduktion deutlich reduziert sind, was für standardisierte Teile wie Kontakte und Elektroden von Vorteil ist.

Die Anlagenkosten des Vakuuminfiltrationsverfahrens sind relativ hoch. Vakuumofen, Induktionsheizsystem und Druckregelgerät erfordern Präzisionsfertigung. Die anfänglichen Investitions- und Wartungskosten sind hoch, was die Produktion in kleinen und mittleren Stückzahlen einschränkt. Der Rohstoffverbrauch umfasst Wolframpulver zur Herstellung poröser Skelette und Silber. Das Sintern

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



des Skeletts und das Schmelzen des Silbers können zu Materialverlust führen, und die Effizienz ist geringer als bei der Pulvermetallurgie. Die Produktionseffizienz wird durch die Prozesskomplexität begrenzt. Parameteranpassung und Qualitätskontrolle erhöhen die Arbeitskosten, und die Stückkosten sind relativ hoch. Beobachtungen zeigen, dass die Produktionskosten für Hochleistungsteile oder komplex geformte Teile akzeptabel sind, die Wirtschaftlichkeit jedoch für Großanwendungen nicht ausreicht.

Arbeitskosten und Energieverbrauch beeinflussen ebenfalls die Gesamtkosten. Die Pulvermetallurgie zeichnet sich durch einen standardisierten Prozessablauf und einen geringen Personalbedarf aus. Der Energieverbrauch konzentriert sich hauptsächlich auf die Sinterphase, die durch Temperaturoptimierung reduziert werden kann. Die Vakuuminfiltration erfordert professionelles Personal, und der langfristige Vakuum- und Heizprozess verbraucht viel Energie, was ein effizientes Energiemanagement erfordert. Eine Kostenanalyse zeigt, dass die Pulvermetallurgie Vorteile hinsichtlich der Kostenkontrolle bietet und sich für hohe Produktionsanforderungen eignet; die Vakuuminfiltration ist bei Komponenten mit hoher Wertschöpfung wettbewerbsfähiger.

Zu den Optimierungsansätzen gehören die Entwicklung kostengünstiger Vakuumanlagen oder die Verbesserung der Pulvermetallurgieeffizienz durch Prozessintegration. Die Kostenanalyse liefert eine quantitative Grundlage für die Prozessauswahl, die je nach Produktionsumfang und Leistungsanforderungen abgewogen werden muss.

#### 4.3.2 Leistungsunterschiede und Prozessauswahl

Leistungsunterschiede sind eine wichtige Grundlage für die Wahl zwischen Pulvermetallurgie und Vakuuminfiltration. Die beiden Verfahren weisen unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Härte, Korrosionsbeständigkeit und mikrostruktureller Konsistenz auf, die sich direkt auf die Anwendungsszenarien auswirken.

Pulvermetallurgisch hergestellte Silber-Wolfram-Legierungen weisen eine stabile elektrische und thermische Leitfähigkeit auf. Die Sinterphase bildet durch Flüssigphasensintern ein kontinuierliches Netzwerk mit hoher Strom- und Wärmeübertragungseffizienz, was sie für Hochspannungsschalterkontakte und Wärmeableitungssubstrate geeignet macht. Die hohe Härte wird durch die gute Verteilung und Dichte der Wolframpartikel erreicht, und die Verschleißfestigkeit entspricht den Anforderungen an Schweißelektroden. Die Korrosionsbeständigkeit hängt von der Kontrolle der Sinteratmosphäre ab und ist nach Optimierung auch in feuchten Umgebungen gut verträglich. Die Konsistenz der Mikrostruktur wird durch die Gleichmäßigkeit der Pulvermischung und -pressung beeinflusst. Geeignete Verfahren reduzieren Defekte und eignen sich für die standardisierte Großserienproduktion.

Die durch Vakuuminfiltration hergestellte Legierung bietet weitere Leistungsvorteile. Flüssiges Silber dringt in das Wolframskelett ein und bildet eine hochdichte Struktur mit extrem geringer Porosität. Die elektrische und thermische Leitfähigkeit ist besser als bei pulvermetallurgischen Verfahren, was sie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

besonders für hochpräzise elektronische Steckverbinder geeignet macht. Die höhere Härte ist aufgrund der verbesserten Dichte und Grenzflächenbindungskraft höher, und die Verschleißfestigkeit und Lichtbogenbeständigkeit sind hervorragend, was sie für plasmagespritzte Teile geeignet macht. Die Korrosionsbeständigkeit wird durch die reduzierte Oxidation im Vakuum verbessert, und die Lebensdauer ist in korrosiven Umgebungen länger. Die Mikrostrukturkonsistenz ist ausgezeichnet, und die Gleichmäßigkeit komplex geformter Teile ist besser, was sie für Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt geeignet macht.

Der Leistungsunterschied ergibt sich aus dem Prozessmechanismus. Die Pulvermetallurgie basiert auf der Gleichmäßigkeit der Pulvermischung und der Sinterparameter. Ihre Leistung ist stabil, der Optimierungsspielraum jedoch begrenzt. Das Vakuuminfiltrationsverfahren erreicht durch Kapillarpenetration eine hohe Dichte und bietet ein höheres Leistungspotenzial, ist jedoch parameterabhängig. Beobachtungen zeigen, dass sich die Pulvermetallurgie für allgemeine Anwendungen eignet, bei denen Kosten und Leistung im Gleichgewicht sein müssen, während die Infiltration für hohe Leistung oder individuelle Anforderungen geeignet ist. Die Prozessauswahl muss anhand der Leitfähigkeitspriorität, der Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit und der Komponentenkomplexität erfolgen. Optimierungsansätze umfassen die Kombination von Prozessvorteilen zur Leistungssteigerung.

#### 4.3.3 Produktionseffizienz und Prozessanpassung

Produktionseffizienz und Prozessanpassung sind wichtige Kriterien für die Auswahl. Pulvermetallurgie und Vakuuminfiltration unterscheiden sich in Leistung, Automatisierungsgrad und Anlagenauslastung, was sich direkt auf den Produktionszyklus und den wirtschaftlichen Nutzen auswirkt.

Die Pulvermetallurgie zeichnet sich durch eine hohe Produktionseffizienz aus. Die Pulvermisch-, Press- und Sinterprozesse lassen sich automatisieren, und die Fließbandproduktion steigert die Produktion, was sich für die Massenproduktion von Kontakten und Elektroden eignet. Die Anlagenauslastung ist hoch, und Pulverpresse und Sinterofen können mit kurzen Wartungsausfallzeiten kontinuierlich betrieben werden. Der Produktionszyklus ist kurz und dauert in der Regel nur wenige Stunden vom Rohmaterial bis zum fertigen Produkt. Dies eignet sich für Szenarien, die eine schnelle Reaktion auf die Marktnachfrage erfordern. Der Prozess ist stark anpassungsfähig, und Standardformen und -parameter eignen sich für eine Vielzahl von Spezifikationen und bieten hohe Flexibilität. Das Vakuuminfiltrationsverfahren weist eine geringe Produktionseffizienz auf. Die Wolframskelettherstellung und der Infiltrationsprozess erfordern eine präzise Steuerung, der Automatisierungsgrad ist begrenzt, und die Produktion eignet sich nur für kleine und mittlere Chargen hochwertiger Teile, wie z. B. Gegengewichte für Flugzeuge. Die Anlagenauslastung wird durch die Komplexität des Vakuumofens beeinträchtigt, und Wartung und Parameteranpassungen erhöhen die Ausfallzeiten. Der Produktionszyklus ist lang, und die Gesamtzeit für Skelettherstellung und Infiltration kann mehrere Tage betragen, was für individuelle Anpassungen oder hohe Leistungsanforderungen geeignet ist. Die Prozessanpassungsfähigkeit hängt vom Form- und Skelettdesign ab. Komplexe Formen erfordern spezielle Ausrüstung, und die Flexibilität ist eingeschränkt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Effizienzunterschied ergibt sich aus der Komplexität des Prozesses. Das pulvermetallurgische Verfahren ist standardisiert und für hohe Leistungen geeignet; die Vakuuminfiltration zeichnet sich durch einen feinen Prozess aus und erfüllt hohe Qualitätsanforderungen. Beobachtungen zeigen, dass das pulvermetallurgische Verfahren in der Massenproduktion deutliche Effizienzvorteile bietet, während das Infiltrationsverfahren in der hochpräzisen Kleinserienfertigung anpassungsfähiger ist. Optimierungsansätze umfassen die Entwicklung automatisierter Infiltrationsanlagen oder die Optimierung pulvermetallurgischer Parameter zur Verkürzung des Zyklus. Produktionseffizienz und Prozessanpassung bilden eine praktische Auswahlgrundlage, die entsprechend den Produktionszielen und Qualitätsanforderungen abgewogen werden muss.



CTIA GROUP LTD Silber-Wolfram-Legierung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Kapitel 5: Leistungstests und Charakterisierung von Silber-Wolfram-Legierungen

Die Leistungsprüfung und Charakterisierung von Silber-Wolfram-Legierungen ist ein wichtiger Schritt zur Bewertung ihrer Qualität und ihres Anwendungspotenzials. Durch systematische Prüfung der physikalischen, mechanischen und funktionellen Eigenschaften wird die Leistung der Legierung hinsichtlich elektrischer Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Härte und Korrosionsbeständigkeit ermittelt. Die Prüfmethode muss mit internationalen Standards und experimentellen Bedingungen kombiniert werden, um die Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten.

### 5.1 Prüfung der physikalischen Eigenschaften einer Silber-Wolfram-Legierung

Die Prüfung der physikalischen Eigenschaften von Silber-Wolfram-Legierungen konzentriert sich auf grundlegende Eigenschaften wie Dichte, Härte und Leitfähigkeit. Diese Indikatoren spiegeln direkt die Mikrostruktur und den Herstellungsprozess der Legierung wider. Die genaue Messung der physikalischen Eigenschaften bildet die Grundlage für nachfolgende mechanische und funktionelle Leistungsprüfungen. Die Prüfmethode muss entsprechend den Eigenschaften der Legierung optimiert werden.

#### 5.1.1 Dichteprüfverfahren

Die Dichteprüfung ist ein wichtiges Mittel zur Bewertung der Dichte und Porosität von Silber-Wolfram-Legierungen. Sie spiegelt die Verteilung von Silber und Wolfram im Material und die Sinterqualität wider. Die Dichte beeinflusst direkt die elektrische Leitfähigkeit, die Wärmeleitfähigkeit und die mechanische Festigkeit. Die Prüfmethode muss Genauigkeit und Wiederholbarkeit gewährleisten.

Die archimedische Methode ist eine häufig verwendete Methode zur Dichtebestimmung. Die Probe wird zunächst im trockenen Zustand gewogen, um das Trockengewicht zu ermitteln. Anschließend wird sie in eine Flüssigkeit mit bekannter Dichte (z. B. destilliertes Wasser) getaucht, um das schwebende und das eingetauchte Gewicht zu messen. Die Dichte berechnet sich nach der Formel:  $\text{Dichte} = \frac{\text{Trockengewicht}}{(\text{Trockengewicht} - \text{Eingetauchgewicht}) \times \text{Flüssigkeitsdichte}}$ . Die Flüssigkeit muss blasenfrei sein, und die Probenoberfläche darf keine Poren aufweisen, die die Messung beeinträchtigen. Um stabile Ergebnisse zu gewährleisten, werden mehrere Tests gemittelt.

Röntgenfluoreszenz (RFA) dient als zusätzliche Methode zur indirekten Bewertung der Dichtekonsistenz durch Kombination mikroskopischer Analysen zur Bestimmung der Phasenverteilung. Die Probe wird in dünne Scheiben geschnitten und in ein Röntgengerät gelegt, um das Verhältnis von Silber- und Wolframgehalt zu messen. Die tatsächliche Dichte wird anhand der theoretischen Dichte berechnet. Diese Methode eignet sich für Teile mit komplexen Formen. Zur Fehlerminimierung muss das Gerät kalibriert werden.

Zu den wichtigsten Punkten des Tests gehören die Probenvorbereitung, das Entfernen von Oberflächenoxidschichten und Verunreinigungen sowie die Vermeidung von Feuchtigkeitsaufnahme, die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



die Ergebnisse beeinträchtigt. Die Testumgebung muss eine konstante Temperatur und Luftfeuchtigkeit aufweisen, um externe Störungen zu reduzieren. Beobachtungen zeigen, dass die Dichte der Legierung mit optimiertem Sinterprozess nahe am theoretischen Wert liegt, mit geringer Porosität und hervorragender Leistung. Die Genauigkeit der Dichteprüfmethode liefert zuverlässige Daten zur Leistungsbewertung. Die Optimierungsrichtung umfasst die Entwicklung berührungsloser Messtechnik zur Verbesserung der Effizienz.

### 5.1.2 Härteprüfnormen und -verfahren

Die Härteprüfung ist ein wichtiges Mittel zur Bewertung der Verformungs- und Verschleißfestigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen und spiegelt den synergistischen Effekt von Wolframpartikeln und Silberphase wider. Die Härte beeinflusst die Lebensdauer der Legierung bei mechanischem Kontakt und Lichtbogenbeanspruchung. Die Prüfung muss internationalen Standards entsprechen und die Durchführung standardisieren.

Die Vickers-Härteprüfung ist ein weit verbreiteter Standard gemäß ISO 6507 bzw. ASTM E384. Bei der Prüfung wird ein Diamanteindringkörper mit einer bestimmten Last in die Probenoberfläche gedrückt, für eine bestimmte Zeit gehalten und anschließend entfernt, um die diagonale Länge des Eindrucks zu messen. Der Härtewert wird mit folgender Formel berechnet:  $HV = 1,854 \times \text{Last} / (\text{diagonale Länge}^2)$ . Die Last wird entsprechend der Probendicke gewählt (üblicherweise 5 kg oder 10 kg), und die Zeit wird auf 10–15 Sekunden geregelt. Die Prüfschritte umfassen die Probenvorbereitung, das Polieren der Oberfläche auf Hochglanz sowie das Entfernen von Kratzern und Defekten. Die Prüfpunkte werden in einem gleichmäßigen Bereich ausgewählt, um zu vermeiden, dass Poren oder Phasengrenzen die Ergebnisse beeinflussen. Für jede Prüfung werden mehrere Punkte wiederholt gemessen, und zur Fehlerminimierung wird der Durchschnitt ermittelt. Das Gerät muss regelmäßig kalibriert werden, um die Genauigkeit von Eindrückkörper und Last sicherzustellen.

Die Brinellhärteprüfung ist eine ergänzende Methode gemäß ISO 6506. Sie verwendet einen Stahlkugeln-Eindrückkörper und eignet sich für größere Proben. Die Belastung ist höher, der Eindruck größer, was die Gesamthärte widerspiegelt. Allerdings sind die Anforderungen an die Oberflächenebenheit höher. Das Prüfergebn bezieht sich auf die Vickershärte und muss entsprechend den Anwendungsanforderungen ausgewählt werden.

Zu den wichtigsten Punkten des Tests gehört die Abstimmung von Belastung und Zeit. Eine zu hohe Belastung kann die Probe durchdringen, eine zu kurze Zeit kann die Bildung von Eindrücken beeinträchtigen. Umgebungstemperatur und -feuchtigkeit müssen stabil sein, um die Materialeigenschaften nicht zu beeinträchtigen. Beobachtungen zeigen, dass die Härte der Legierung mit optimierter Mikrostruktur deutlich verbessert und die Verschleißfestigkeit erhöht wird. Härteprüfnormen und -verfahren bilden eine quantitative Grundlage für die Leistungsbewertung. Zu den Optimierungsansätzen gehört die Entwicklung eines automatisierten Prüfsystems zur Verbesserung der Effizienz.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5.1.3 Prüfverfahren für elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit

Die Prüfung der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit ist ein wichtiges Mittel zur Bewertung der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen. Sie spiegelt die Kontinuität des Silberphasennetzwerks und die Dichte der Mikrostruktur wider. Die elektrische Leitfähigkeit misst die Effizienz der Stromübertragung, die thermische Leitfähigkeit die Wärmeübertragungskapazität. Die Prüfmethode muss Genauigkeit und Wiederholbarkeit gewährleisten. Der Leitfähigkeitstest erfolgt mit der Vier-Sonden-Methode gemäß ASTM F76. Die Probenoberfläche ist flach und wird in die Prüfvorrichtung eingelegt. Vier Sonden berühren sich in gleichmäßigen Abständen. Ein konstanter Strom wird angelegt und der Spannungsabfall gemessen. Die Leitfähigkeit berechnet sich nach der Formel:  $\sigma = L / (R \times A)$ , wobei L der Sondenabstand, R der Widerstand und A die Querschnittsfläche ist. Die Messpunkte werden gleichmäßig verteilt, um Porenbildung zu vermeiden. Das Gerät muss kalibriert werden, die Umgebungstemperatur muss konstant gehalten werden, und der Durchschnittswert wird nach mehreren Messungen ermittelt.

Die Wärmeleitfähigkeitsprüfung erfolgt mit der Laserblitzmethode gemäß ASTM E1461. Die Probe wird in dünne Scheiben geschnitten, deren Oberfläche geschwärzt wird, um den Laser zu absorbieren. Der Laserpuls erwärmt eine Seite, und der Infrarotdetektor misst die Temperaturanstiegskurve auf der anderen Seite. Die Wärmeleitfähigkeit wird anhand der Temperaturleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte berechnet:  $\lambda = \alpha \times \rho \times C_p$ , wobei  $\alpha$  die Temperaturleitfähigkeit,  $\rho$  die Dichte und  $C_p$  die spezifische Wärmekapazität ist. Bei der Prüfung müssen Probendicke und Laserenergie kontrolliert werden, um den Einfluss von Wärmeverlusten zu reduzieren. Zu den wichtigsten Punkten des Tests gehören die Probenvorbehandlung, das Entfernen der Oberflächenoxidschicht und die Sicherstellung eines guten Kontakts. Der Leitfähigkeitstest erfordert eine Abschirmung elektromagnetischer Störungen, und der Wärmeleitfähigkeitstest erfordert eine Kalibrierung der Detektorgenaugkeit. Beobachtungen zeigen, dass die optimierte Sinterlegierung eine höhere Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit aufweist, wobei die Mikrostrukturdichte der entscheidende Faktor ist. Optimierungsrichtungen umfassen die Entwicklung zerstörungsfreier Prüftechnologien oder die Kombination mehrerer Methoden zur Verbesserung der Messgenauigkeit.

### 5.2 Bewertung der chemischen Eigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung

Die Bewertung der chemischen Leistung von Silber-Wolfram-Legierungen konzentriert sich auf Korrosionsbeständigkeit und chemische Stabilität und spiegelt die langfristige Einsatzfähigkeit der Legierung in verschiedenen Umgebungen wider. Die Prüfung der chemischen Leistung muss tatsächliche Betriebsbedingungen simulieren, die Korrosionsbeständigkeit der Silber- und Wolframphase bewerten und zuverlässige Daten für die Anwendung liefern.

#### 5.2.1 Prüfumgebung und -methoden für Korrosionsbeständigkeit

Der Korrosionsbeständigkeitstest bewertet die chemische Stabilität einer Silber-Wolfram-Legierung durch die Simulation verschiedener Umgebungen. Die Testumgebung und -methode müssen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

entsprechend dem Anwendungsszenario gestaltet werden, um die Repräsentativität der Ergebnisse sicherzustellen. Die Korrosionsbeständigkeit spiegelt die Fähigkeit der Legierung wider, Oxidation, Sulfidierung oder Säure-Base-Korrosion zu widerstehen, was sich direkt auf die Lebensdauer auswirkt. Der Salzsprühtest ist eine gängige Umgebung und entspricht der Norm ASTM B117. Die Probe wird in eine Salzsprühkammer gegeben und mit einer 5%igen Natriumchloridlösung besprüht. Die Temperatur wird mehrere Stunden bis mehrere Tage lang in einem bestimmten Bereich geregelt. Beobachten Sie die Korrosionsprodukte an der Oberfläche, wie z. B. Silberoxide oder -sulfide, und bewerten Sie Tiefe und Fläche der Erosion. Der Test zeichnet die Gewichtsverluste und die Veränderungen des Aussehens auf, und mehrere Zyklen simulieren eine langfristige Belastung.

Der Säure-Base-Immersionstest simuliert eine korrosive Industrieumgebung. Die Probe wird in Schwefelsäure, Salzsäure oder Natronlauge getaucht. Konzentration und Temperatur werden bedarfsgerecht eingestellt. Die Eintauchdauer beträgt einige Stunden bis einige Wochen. Die Probe wird regelmäßig entnommen, um den Massenverlust und die Oberflächenmorphologie zu messen sowie die Auflösung der Silberphase und die Stabilität der Wolframphase zu analysieren. Die Lösung muss regelmäßig ausgetauscht werden, um die chemische Aktivität aufrechtzuerhalten. Elektrochemische Tests bewerten Korrosionsmechanismen gemäß ASTM G59. Die Probe wird als Arbeitselektrode in eine Elektrolysezelle eingebracht, verschiedene Potentiale angelegt und Polarisationskurven gemessen. Der Test zeichnet das Korrosionspotential und die Korrosionsstromdichte auf, um das elektrochemische Verhalten der Silber-Wolfram-Grenzfläche zu analysieren. Die Umgebung umfasst neutrale oder saure Elektrolyte, und der Sauerstoffgehalt muss kontrolliert werden.

Die Testumgebung muss die tatsächlichen Einsatzbedingungen simulieren, beispielsweise feuchte, schwefelhaltige oder hochtemperierte Umgebungen. Die Probenvorbehandlung umfasst Polieren und Reinigen, um Oberflächenverunreinigungen zu entfernen. Beobachtungen zeigen, dass Legierungen mit optimierter Mikrostruktur eine verbesserte Korrosionsbeständigkeit in Salzsprühnebel und sauren Umgebungen aufweisen. Geringe Porosität ist dabei entscheidend. Optimierungsrichtungen umfassen die Entwicklung dynamischer Korrosionstestsysteme oder die Kombination von Multi-Umgebungssimulationen zur Verbesserung der Bewertungsgenauigkeit.

### 5.2.2 Methoden zur Prüfung der antioxidativen Leistung

Der Oxidationsbeständigkeitstest bewertet die Oxidationsbeständigkeit der Silber-Wolfram-Legierung bei hohen Temperaturen oder in sauerstoffhaltiger Umgebung und spiegelt die chemische Stabilität der Silber- und Wolframphase wider. Die Testmethode muss die tatsächlichen Einsatzbedingungen simulieren, die Bildung einer Oxidschicht und die Veränderung der Materialeigenschaften messen und eine quantitative Grundlage für die Oxidationsbeständigkeit liefern.

Hochtemperaturoxidationstests sind eine gängige Methode. Die Probe wird in einen Muffelofen gegeben, auf eine bestimmte Temperatur erhitzt und mehrere Stunden bis Tage lang der Luft ausgesetzt. Die Temperatur richtet sich nach den Anwendungsanforderungen und liegt üblicherweise über dem Schmelzpunkt von Silber, aber unter dem Schmelzpunkt von Wolfram. Der Test zeichnet die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Massenzunahme auf und beobachtet die Dicke und Farbveränderung der Oberflächenoxidschicht, beispielsweise von Silberoxid für Silber oder Wolframoxid. Mehrere Zyklen simulieren die Langzeitorxidation und bewerten den Leistungsabfall.

Die thermogravimetrische Analyse (TGA) ermöglicht eine dynamische Detektion. Die Probe wird in einer Thermowaage von Raumtemperatur auf hohe Temperatur erhitzt und die Kurve der Massenänderung im Zeitverlauf aufgezeichnet. Sauerstoff oder Luft werden als Trägergas verwendet, um die Oxidationsreaktionsrate und die stabile Temperatur zu messen. Die Analyseergebnisse zeigen den Ausgangspunkt der Oxidation der Silberphase und die antioxidative Kapazität der Wolframphase. Das Gerät muss kalibriert werden, um thermische Drift zu vermeiden. Die Differenzial-Scanning-Kalorimetrie (DSC) dient als zusätzliche Methode zur Erfassung der thermischen Wirkung von Oxidationsreaktionen. Die Proben werden in einer inerten und einer oxidierenden Atmosphäre getestet, und die endothermen bzw. exothermen Peaks werden verglichen, um die kritische Temperatur der Oxidationsreaktion zu bestimmen. Diese Methode eignet sich für die Spurenoxidationsanalyse und muss in Kombination mit TGA-Daten verifiziert werden.

### 5.3 Technologie zur Charakterisierung der Mikrostruktur von Silber-Wolfram-Legierungen

Die Mikrostrukturanalyse von Silber-Wolfram-Legierungen zeigt Kornmorphologie, Phasenverteilung und Defekteigenschaften mithilfe verschiedener Analysemethoden und bietet so eine mikroskopische Grundlage für die Leistungsoptimierung. Die Charakterisierungstechnologie muss mit der Probenvorbereitung und den Gerätebedingungen kombiniert werden, um die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

#### 5.3.1 Metallografische Mikroskop-Beobachtungsmethode

Die metallografische Mikroskop-Beobachtungsmethode ist ein grundlegendes Mittel zur Charakterisierung der Mikrostruktur von Silber-Wolfram-Legierungen. Korngröße, Phasenverteilung und Poreneigenschaften werden durch Probenvorbereitung und mikroskopische Analyse enthüllt. Die Methode eignet sich für eine vorläufige Strukturbewertung und wird mit Korrosions- und Beleuchtungstechniken kombiniert, um den Kontrast zu verbessern. Die Probenvorbereitung ist ein wichtiger Schritt. Nehmen Sie eine repräsentative Probe, schneiden Sie sie auf die entsprechende Größe zu, schleifen Sie die Oberfläche zu einer flachen Fläche und verfeinern Sie sie schrittweise mit Sandpapier zu einer feinen Maschenweite. Zum Polieren wird eine Diamantsuspension oder Aluminiumoxid verwendet, um einen Spiegeleffekt zu erzielen. Bei der Korrosionsbehandlung werden chemische Reagenzien, wie beispielsweise eine alkoholische Salpetersäurelösung, verwendet, um die Grenze zwischen der Silberphase und der Wolframphase freizulegen. Die Korrosionszeit wird kontrolliert, um ein Überätzen und eine Beeinträchtigung der Klarheit der Mikrostruktur zu vermeiden.

Die Beobachtung erfolgte mit einem optischen Mikroskop mit einer Vergrößerung von 50- bis 1000-fach, abhängig von den Strukturmerkmalen. Hellfeldbeleuchtung zeigte die Kornmorphologie, während Dunkelfeld- oder polarisiertes Licht den Phasengrenzkontrast verstärkte. Wolframpartikel erschienen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



dunkel, Silberphasen hell und Poren als schwarze Hohlräume. Zur Analyse der Korngröße und der Verteilungsgleichmäßigkeit wurden Mehrbereichsbilder aufgenommen. Zu den wichtigsten Punkten des Tests gehört die Probenreinigung, um zu verhindern, dass Verunreinigungen das Mikroskopobjektiv beeinträchtigen. Beleuchtungsintensität und Fokus müssen angepasst werden, um die Bildqualität zu optimieren. Die Beobachtung zeigt, dass die optimierte Sinterlegierung klare Korngrenzen, geringe Porosität und eine gleichmäßige Mikrostruktur aufweist. Die Methode eignet sich für eine schnelle Auswertung und muss zur Verifizierung der Details mit SEM kombiniert werden.

### 5.3.2 Anwendung der Rasterelektronenmikroskop-Analyse

Die Rasterelektronenmikroskopie (REM) ist ein effizientes Mittel zur Charakterisierung der Mikrostruktur von Silber-Wolfram-Legierungen. Durch die Wechselwirkung zwischen Elektronenstrahl und Probe werden Bilder erzeugt, die Kornmorphologie, Phasenverteilung und Defektdetails sichtbar machen. REM eignet sich für hochauflösende Beobachtungen und liefert in Kombination mit energiedispersiver Spektroskopie (EDS) Informationen zur Elementverteilung.

Die Probenvorbereitung umfasst Schneiden, Schleifen und Polieren, um eine ebene Oberfläche zu erhalten. Eine Gold- oder Kohlenstoffbeschichtung erhöht die Leitfähigkeit und verhindert Aufladungseffekte durch Elektronenstrahlen. Die Probe wird in die SEM-Probenkammer eingebracht, und die Vakuumumgebung gewährleistet die Stabilität des Elektronenstrahls. Die Beschleunigungsspannung liegt üblicherweise bei 5–20 kV, und der Arbeitsabstand wird entsprechend der Vergrößerung angepasst. Beobachten Sie die fokussierte Korngröße und -morphologie. Wolframpartikel sind polygonal oder kugelförmig, die Silberphasenverteilung ist netzartig oder aggregiert. Die Vergrößerung reicht von hundert- bis zehntausendfach und zeigt mikroskopische Poren und Mikrorisse. Die EDS-Analyse bestimmt das Silber-Wolfram-Verhältnis und identifiziert Verunreinigungen oder Oxide an der Grenzfläche. Sekundärelektronenbilder verdeutlichen die Oberflächenmorphologie, und reflektierte Elektronenbilder verstärken den Phasengrenzkontrast.

Zu den wichtigsten Punkten des Tests gehört die Abstimmung von Spannung und Stromstärke. Eine zu hohe Spannung kann die Probe beschädigen. Die Probe sollte sauber sein, um Verunreinigungen zu vermeiden. Die Datenerfassung erfordert Mehrpunktmessungen, um die Repräsentativität zu gewährleisten. Beobachtungen zeigen, dass die optimierte Sinterlegierung eine geringe Porosität und eine gute Grenzflächenhaftung aufweist, und EDS bestätigt eine gleichmäßige Phasenverteilung. Anwendungsgebiete sind die Defektanalyse und die Phasenzustandsforschung. Optimierungsrichtungen umfassen die Entwicklung von Umwelt-SEM zur Verbesserung der dynamischen Beobachtungsmöglichkeiten.

### 5.3.3 Strukturanalyse mittels Röntgenbeugung

Die Röntgenbeugung (XRD) ist eine wichtige Technik zur Analyse der Kristallstruktur und Phasenzusammensetzung von Silber-Wolfram-Legierungen. Durch die Wechselwirkung der Röntgenstrahlen mit dem Probengitter werden Beugungsmuster erzeugt, aus denen sich Kristallphase,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kornausrichtung und Spannungszustand ablesen lassen. XRD eignet sich zur quantitativen Analyse mikrostruktureller Eigenschaften. Zur Vermeidung von Streustörungen muss die Probe zu Pulver oder flachen Blöcken mit glatter Oberfläche gemahlen werden. Die Probe wird in das XRD-Gerät gegeben. Optional kann ein Vakuum oder eine inerte Atmosphäre herrschen, um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch Oxidation zu verhindern. Als Röntgenquelle wird Cu-K $\alpha$ -Strahlung verwendet, der Scanwinkel beträgt 10° bis 90° und die Schrittweite wird der Auflösung angepasst. Der analytische Schwerpunkt liegt auf der Kristallphasenidentifizierung, die Beugungspeaks von Silber und Wolfram entsprechen jeweils kubisch-flächenzentrierten und kubisch-raumzentrierten Strukturen. Intensität und Breite des Peaks spiegeln Korngröße und Mikrospannung wider. Die Scherle-Formel berechnet die Korngröße:  $D = K\lambda / (\beta \cos\theta)$ , wobei D die Korngröße,  $\beta$  die Peakbreite und  $\theta$  der Beugungswinkel ist. Die Verschiebung der Peakposition analysiert die Eigenspannung, und die Peakaufspaltung zeigt das Vorhandensein mehrerer Phasen an. Zu den wichtigsten Punkten des Tests gehören die Kalibrierung des Geräts und die Beseitigung von Gerätefehlern. Die Gleichmäßigkeit der Probe beeinflusst die Ergebnisse, und zur Ermittlung des Durchschnittswerts sind mehrere Tests erforderlich. Beobachtungen zeigen, dass Legierungen mit optimierten Prozessen schmale Beugungspeaks, feine Körner und geringe Eigenspannungen aufweisen. Anwendungsgebiete sind die Phasenquantifizierung und die Gitterdefektforschung, und Optimierungsrichtungen umfassen die Synchrotronstrahlungs-Röntgenbeugung zur Verbesserung der Auflösung.



CTIA GROUP LTD Silber-Wolfram-Legierung

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<br>(%weight) | Density<br>(/g.cm3) | Electrical<br>conductivity | Electrical<br>resistivity | Hardness<br>(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](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [silver-tungsten.net](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

## Kapitel 6: Anwendungsgebiete der Silber-Wolfram-Legierung

Silber-Wolfram-Legierungen bieten aufgrund ihrer hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Härte und Korrosionsbeständigkeit ein breites Anwendungspotenzial in vielen anspruchsvollen Bereichen. Ihre einzigartige Mikrostruktur sowie ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften machen sie zu einem idealen Werkstoff für Branchen wie die Elektro-, Schweiß- und Luft- und Raumfahrtindustrie.

### 6.1 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen im elektrischen Feld

Silber-Wolfram-Legierungen werden häufig in Schlüsselkomponenten wie Hochspannungsschaltern, Relais und Niederspannungsschaltern in der Elektrotechnik eingesetzt. Ihre hohe Leitfähigkeit und Lichtbogenerosionsbeständigkeit erfüllen die Anforderungen an hohe Ströme und häufiges Schalten. Die nichtmagnetischen Eigenschaften der Legierung verhindern elektromagnetische Störungen, und ihre Härte und Verschleißfestigkeit verlängern die Lebensdauer der Kontakte, was sie zu einem unverzichtbaren Werkstoff in elektrischen Geräten macht. Anwendungsszenarien umfassen industrielle Steuerungen, Stromübertragung und Haushaltsgeräte. Leistungsoptimierungen unterstützen die Zuverlässigkeit in verschiedenen Umgebungen.

#### 6.1.1 Anwendungsvorteile in Niederspannungs-Leistungsschaltern

Die Vorteile der Silber-Wolfram-Legierung in Niederspannungsschaltern liegen in ihrer hervorragenden Gesamtleistung, insbesondere bei Hochstromschaltungen und hoher Lichtbogenfestigkeit. Niederspannungsschalter dienen zum Ein- und Ausschalten von Stromkreisen und müssen häufigen Betätigungen und Lichtbogenschlägen standhalten. Die hohe Härte, Antihafteigenschaft und Leitfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung machen sie zur idealen Wahl. Der Einsatz der Legierung in Schaltkontakten verbessert die Sicherheit und Lebensdauer der Geräte deutlich.

Die hohe Leitfähigkeit von Silber sorgt für einen niederohmigen Pfad, reduziert den Energieverlust beim Schalten und verbessert die Betriebseffizienz. Der hohe Schmelzpunkt und die Härte von Wolfram verhindern Lichtbogenerosion und verlängern die Lebensdauer der Kontakte, insbesondere bei hochfrequenten Schaltvorgängen. Antihafteigenschaften verhindern das Anhaften der Kontakte am Gegenmaterial und gewährleisten so zuverlässiges Schalten. Die Legierung mit optimierter Mikrostruktur bleibt in feuchter oder schwefelhaltiger Umgebung stabil und verbessert so die Umweltverträglichkeit. In der Praxis bewähren sich Kontakte aus Silber-Wolfram-Legierungen in Niederspannungsschaltern, insbesondere in der industriellen Motorsteuerung und im Haushaltsgeräteschutz. Im Vergleich zu herkömmlichen Materialien wie reinem Silber oder Kupferlegierungen weisen Silber-Wolfram-Legierungen eine deutlich bessere Verschleißfestigkeit und Lichtbogenbeständigkeit auf, was den Wartungsaufwand reduziert. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses, um Leitfähigkeit und Haltbarkeit in Einklang zu bringen, oder die weitere Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit durch Oberflächenbeschichtungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



#### 6.1.1.1 Leistungsanforderungen an Materialien von Niederspannungsschaltern

Die Leistungsanforderungen an Niederspannungsschalter an die Materialien bestimmen unmittelbar die Eignung von Silber-Wolfram-Legierungen. Diese müssen die Zuverlässigkeitsanforderungen bei hoher Strombelastbarkeit, häufigem Schalten und Lichtbogenbildung erfüllen. Die Leistungsanforderungen umfassen Leitfähigkeit, Härte, Lichtbogenerosionsbeständigkeit, Antihaft- und Korrosionsbeständigkeit, um die Sicherheit und lange Lebensdauer des Schalters zu gewährleisten.

Leitfähigkeit ist die wichtigste Anforderung. Das Material muss einen Pfad mit geringem Widerstand bieten, um eine effiziente Stromübertragung zu gewährleisten. Niederspannungsschalter müssen im eingeschalteten Zustand Hunderte bis Tausende Ampere Strom übertragen. Unzureichende Leitfähigkeit kann zu Überhitzung oder Energieverlust führen und so die Effizienz der Geräte beeinträchtigen. Das Silberphasennetzwerk aus Silber-Wolfram-Legierung erfüllt diese Anforderung und gewährleistet einen reibungslosen Stromfluss.

Härte ist ein wichtiges Merkmal. Die Kontakte müssen mechanischem Verschleiß und Lichtbogenschlag standhalten. Häufige Schaltvorgänge können zu Oberflächenverformungen oder Materialablösungen führen, und Materialien mit unzureichender Härte sind anfällig für Ausfälle. Die hohe Härte von Wolfram bietet eine solide Basis für die Silber-Wolfram-Legierung, die sich an hochfrequente Kontaktszenarien anpasst und die Lebensdauer verlängert. Die Widerstandsfähigkeit gegen Lichtbogenerosion ist eine zentrale Anforderung. Der beim Trennen des Schalters entstehende Lichtbogen kann das Material schmelzen oder verdampfen und die Kontaktoberfläche erodieren. Um Verluste zu minimieren, muss das Material bei hohen Temperaturen stabil bleiben. Der hohe Schmelzpunkt der Wolframphase und die Wärmeleitfähigkeit der Silberphase der Silber-Wolfram-Legierung sorgen für eine effektive Widerstandsfähigkeit gegen Lichtbogenerosion und eignen sich für Anwendungen mit hohen Stromabschaltungen.

Die Antihafteffekte gewährleisten eine zuverlässige Trennung. Der Kontakt kann bei mechanischem Kontakt oder Lichtbogenbildung am Gegenmaterial haften bleiben, was zu einem Schalterausfall führen kann. Das Material weist geringe Haftseigenschaften auf. Das Wolframskelett und die optimierte Silberbenetzung der Silber-Wolfram-Legierung reduzieren das Adhäsionsrisiko und gewährleisten Betriebsstabilität.

Korrosionsbeständigkeit garantiert die Anpassungsfähigkeit an Umweltbedingungen. Schalter können feuchter, schwefelhaltiger oder industrieller Atmosphäre ausgesetzt sein, und Korrosion kann die Leitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigen. Die Oxidationsbeständigkeit der Wolframphase und die Stabilität der Silberphase der Silber-Wolfram-Legierung erfüllen diese Anforderung, und die optimierte Mikrostruktur erhöht die Haltbarkeit zusätzlich.

Diese Leistungsanforderungen bilden zusammen die strengen Standards für Materialien von Niederspannungsschaltern. Die Silber-Wolfram-Legierung erfüllt diese Anforderungen effektiv durch

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ihre Mikrostruktur und Zusammensetzung und bietet eine zuverlässige Unterstützung des elektrischen Felds.

#### 6.1.1.2 Anwendungen von Silber-Wolfram-Legierungen in Niederspannungsschaltern

Silber-Wolfram-Legierungen werden hauptsächlich in wichtigen Kontaktteilen von Niederspannungsschaltern verwendet, da sie sich direkt auf die Ein-/Aus-Leistung und Lebensdauer des Schalters auswirken. Zu den spezifischen Anwendungsteilen gehören bewegliche Kontakte, statische Kontakte und Lichtbogenisulationskontakte mit unterschiedlichen Funktionsanforderungen.

Der bewegliche Kontakt ist das bewegliche Kontaktteil im Niederspannungsschalter. Silber-Wolfram-Legierungen werden hier aufgrund ihrer hohen Leitfähigkeit und Beständigkeit gegen Lichtbogenkorrosion häufig verwendet. Beim Schließen und Öffnen des Schalters ist der bewegliche Kontakt mechanischen Stößen und Lichtbogenbildung ausgesetzt. Die Härte der Legierung verhindert Verschleiß, und die Silberphase gewährleistet eine widerstandsarme Stromübertragung. Der statische Kontakt ist ein festes Kontaktteil, das mit dem beweglichen Kontakt zusammenarbeitet. Die hohe Verschleißfestigkeit und die Antihafteigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung gewährleisten eine langfristig stabile Kontaktzuverlässigkeit. Lichtbogenisulationskontakte dienen zur Isolierung von Lichtbögen beim Abschalten großer Ströme. Der hohe Schmelzpunkt und die Oxidationsbeständigkeit der Legierung reduzieren effektiv die Lichtbogenablation und verlängern die Lebensdauer der Komponenten.

Die Auswahl dieser Teile basiert auf den mikrostrukturellen Eigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung, wobei das Wolframskelett für mechanischen Halt sorgt und das Silbernetzwerk die Leitfähigkeit optimiert. Im optimierten Design kann die Kontaktoberfläche durch elektrochemisches Polieren oder Beschichten zusätzlich verbessert werden, um sie an Hochfrequenzbetrieb oder feuchte Umgebungen anzupassen. In der Praxis bewährt sich die Kombination aus beweglichen und statischen Kontakten in der industriellen Motorsteuerung und in Haushaltsschaltern, wobei Lichtbogenisulationskontakte besonders in Hochstromszenarien kritisch sind.

#### 6.1.1.3 Vorteile der Verwendung von PCB-Materialien in Niederspannungsschaltern im Vergleich zu anderen Materialien

Im Vergleich zu anderen häufig verwendeten Materialien wie reinem Silber, Kupferlegierungen und Silber-Cadmiumoxid bietet die Silber-Wolfram-Legierung erhebliche Anwendungsvorteile in Niederspannungsschaltern. Diese Vorteile beruhen auf ihrer einzigartigen Kombination von Eigenschaften und eignen sich besonders für Umgebungen mit hohen Anforderungen.

Im Vergleich zu reinem Silber weist die Silber-Wolfram-Legierung eine höhere Härte und Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit auf. Obwohl reines Silber eine ausgezeichnete Leitfähigkeit aufweist, ist es weich und verschleißfest. Es schmilzt schnell unter Lichtbogeneinwirkung und hat eine kurze Lebensdauer. Durch die Zugabe von Wolfram verbessert sich die Härte der Silber-Wolfram-Legierung, und die Ablationsbeständigkeit ist ausgezeichnet. Dies verlängert die Lebensdauer des Kontakts,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

insbesondere bei häufigem Schalten. Reines Silber oxidiert in feuchter Umgebung leicht. Die Wolframphase der Silber-Wolfram-Legierung bietet Oxidationsschutz und verbessert die Anpassungsfähigkeit an die Umgebung.

Im Vergleich zu Kupferlegierungen weisen Silber-Wolfram-Legierungen eine bessere Leitfähigkeit und bessere Antihafteigenschaften auf. Kupferlegierungen haben eine höhere Härte, aber eine geringere Leitfähigkeit als Silber, einen höheren Widerstand und neigen zur Wärmeentwicklung. Das Silberphasennetzwerk von Silber-Wolfram-Legierungen reduziert Widerstand und Energieverlust. Seine Antihafteigenschaften verhindern Kontakthaftung und gewährleisten eine zuverlässige Trennung. Kupferlegierungen neigen zum Schmelzen und Verformen unter Lichtbögen, während die hochschmelzende Wolframphase von Silber-Wolfram-Legierungen effektiv widersteht und für Hochstromanwendungen geeignet ist.

Im Vergleich zu Silber-Cadmiumoxid ist die Silber-Wolfram-Legierung ungiftig und weist eine bessere Korrosionsbeständigkeit auf. Silber-Cadmiumoxid weist eine gute Lichtbogen- und Schweißbeständigkeit auf, Cadmiumdampf ist jedoch giftig, und Umweltvorschriften schränken seine Verwendung ein. Die Silber-Wolfram-Legierung enthält keine schädlichen Elemente und erfüllt die Umweltauflagen. Ihre Wolframphase weist eine bessere Korrosionsbeständigkeit als Cadmiumoxid auf, insbesondere in schwefelhaltigen oder sauren Umgebungen. Obwohl Silber-Cadmiumoxid eine hohe Leitfähigkeit aufweist, neigt es nach längerem Gebrauch zur Alterung. Die optimierte Mikrostruktur der Silber-Wolfram-Legierung gewährleistet langfristige Zuverlässigkeit.

Diese Vorteile ermöglichen es, herkömmliche Materialien in Niederspannungsschaltern durch Silber-Wolfram-Legierungen zu ersetzen. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Leistungssteigerung durch nanoskalige Pulver oder die Entwicklung von Verbundbeschichtungen zur Erhöhung der Lichtbogenbeständigkeit.

#### 6.1.2 Bedarf an Elektrolegierungen für Hochspannungsschalter

Elektrische Legierungen für Hochspannungsschalter müssen extrem hohe Leistungsanforderungen erfüllen, um hohen Strömen, starken Lichtbögen und extremen Umgebungsbedingungen standzuhalten und den sicheren Betrieb von Stromsystemen zu gewährleisten. Als geeignetes Material muss die Silber-Wolfram-Legierung die spezifischen Anforderungen von Hochspannungsschaltern erfüllen, um die technischen Anforderungen der Anwendungen zu erfüllen.

Elektrische Leitfähigkeit ist eine Grundvoraussetzung. Hochspannungsschalter benötigen einen niederohmigen Pfad, um thermische Effekte beim Trennen von Tausenden von Ampere Stromstärke zu reduzieren. Das Silberphasennetzwerk der Silber-Wolfram-Legierung erfüllt diese Anforderung und gewährleistet eine effiziente Stromübertragung. Entscheidend ist die Widerstandsfähigkeit gegen Lichtbogenabnutzung. Starke Lichtbögen können herkömmliche Materialien zum Schmelzen bringen. Die Kombination aus der hochschmelzenden Wolframphase und der wärmeleitenden Silberphase der Legierung schützt vor Ablation und verlängert die Lebensdauer.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Härte und Verschleißfestigkeit gewährleisten die mechanische Stabilität. Die beweglichen und statischen Kontakte von Hochspannungsschaltern stehen häufig unter hohem Druck und müssen Verschleiß und Verformung standhalten. Die hohe Härte von Wolfram sorgt für festen Halt, und die Duktilität von Silber puffert Spannungen ab, was für den dynamischen Betrieb geeignet ist. Die Antihaftwirkung gewährleistet eine zuverlässige Trennung. Kontakte können bei hohen Lichtbogentemperaturen verkleben, und die geringe Haftung der Silber-Wolfram-Legierung verhindert ein Versagen.

Hohe Temperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit eignen sich für extreme Umgebungen. Hochspannungsschalter können hohen Temperaturen, Feuchtigkeit oder Industriemischgasen ausgesetzt sein. Legierungen müssen daher oxidations- und korrosionsbeständig sein. Die Oxidationsbeständigkeit von Wolfram und die Stabilität von Silber erfüllen diese Anforderung. Optimierte Mikrostrukturen erhöhen die Haltbarkeit zusätzlich. Nichtmagnetische Eigenschaften vermeiden elektromagnetische Störungen und gewährleisten eine präzise Steuerung von Hochspannungssystemen.

Diese Anforderungen treiben die Entwicklung von Silber-Wolfram-Legierungen für Hochspannungsschalter voran. Optimierungsansätze umfassen die Anpassung des Zusammensetzungsverhältnisses oder die Einführung eines funktionalen Gradientendesigns, um höheren Strom- und Umweltanforderungen gerecht zu werden.

#### 6.1.2.1 Arbeitsumgebung des Hochspannungsschalters und besondere Anforderungen an Elektrolegierungen

Die Arbeitsumgebung von Hochspannungsschaltern ist komplex und rau. Sie ist geprägt von hohen Temperaturen, hohem Druck, starken Lichtbögen und einer Vielzahl korrosiver Medien. Dies stellt besondere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Elektrolegierungen, um einen langfristig stabilen Betrieb zu gewährleisten. Arbeitsumgebung und Anforderungen wirken sich direkt auf die Materialauswahl und die Optimierungsrichtung aus.

Die Arbeitsumgebung ist geprägt von Hochspannungsfeldern und starken Strömen. Der Schalter muss Stromstärken von Tausenden bis Zehntausenden Ampere trennen, wodurch Hochtemperaturlichtbögen entstehen, deren Temperatur bis zu mehreren Tausend Grad Celsius betragen kann. Zu den Umgebungsbedingungen zählen Industriemischgasen, feuchte oder schwefelhaltige Bereiche, und korrosive Gase wie Schwefeldioxid können den Materialabbau beschleunigen. Mechanische Vibrationen und Stöße sind im Schaltbetrieb üblich, und extreme Temperaturschwankungen erhöhen die Materialbelastung. Außenanwendungen sind zudem UV- und Witterungseinflüssen ausgesetzt, und Innenanwendungen können abgedichtet, aber mit hoher Luftfeuchtigkeit betrieben werden. Besondere Anforderungen sind eine extrem hohe Leitfähigkeit, um die Hochstromübertragung zu unterstützen, die Widerstandserwärmung zu reduzieren und die Effizienz zu gewährleisten. Die Beständigkeit gegen Lichtbogenablation ist entscheidend. Lichtbogenablation kann zu Kontaktfehlern führen, daher muss das Material bei hohen Temperaturen stabil bleiben. Härte und Verschleißfestigkeit widerstehen mechanischem Verschleiß und Lichtbogeneinwirkung und verlängern die Kontaktlebensdauer. Die Antihaftwirkung gewährleistet eine zuverlässige Trennung und verhindert, dass Kontakthaftung zu

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Fehlern führt. Hohe Temperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit halten extremen Umgebungen stand, und die Legierung muss oxidations- und chemisch beständig sein. Nichtmagnetische Eigenschaften vermeiden elektromagnetische Störungen und gewährleisten die Genauigkeit von Hochspannungssystemen. Durch die mikrostrukturelle Konsistenz wird das Risiko lokaler Fehler verringert. Der Schlüssel liegt in der Prozessoptimierung.

Diese Anforderungen haben die Entwicklung leistungsstarker Elektrolegierungen gefördert, und Silber-Wolfram-Legierungen müssen diese Anforderungen durch Zusammensetzungs- und Prozessanpassungen erfüllen.

#### 6.1.2.2 Leistung der Silber-Wolfram-Legierung bei der Erfüllung der Anforderungen an Hochspannungsschalter

Die Silber-Wolfram-Legierung erfüllt dank ihrer einzigartigen Eigenschaftskombination die hohen Anforderungen von Hochspannungsschaltern. Der synergistische Effekt der Silber- und Wolframphase sorgt für hervorragende Leitfähigkeit, Lichtbogenerosionsbeständigkeit und Haltbarkeit und bietet zuverlässigen Schutz für Hochspannungsanwendungen.

Das Silberphasennetzwerk sorgt für eine extrem hohe Leitfähigkeit. Die hohe Elektronendichte des Silbers sorgt für einen niederohmigen Pfad, unterstützt die Übertragung hoher Ströme und reduziert thermische Effekte. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram erhöht die Widerstandsfähigkeit gegen Lichtbogenerosion. Das Wolframskelett bleibt auch bei hohen Lichtbogentemperaturen stabil. Die Wärmeleitfähigkeit der Silberphase leitet Wärme schnell ab und reduziert Ablationsverluste. Tests zeigen, dass die Oberflächenschädigung von Kontakten aus Silber-Wolfram-Legierungen beim Trennen hoher Ströme deutlich geringer ist als bei Kupferlegierungen.

Die Härte und Verschleißfestigkeit werden durch Wolframpartikel unterstützt. Die Legierung widersteht mechanischen Stößen und häufigem Kontaktverschleiß und verlängert so die Lebensdauer des Kontakts. Die Duktilität von Silber puffert Spannungen ab, und die Härte ist nach Optimierung der Mikrostruktur gleichmäßig, was für den dynamischen Betrieb geeignet ist. Die Antihafteigenschaft wird durch die geringen Hafteigenschaften von Wolfram und die optimierte Benetzung von Silber erreicht. Der Kontakt haftet unter Lichtbogeneinwirkung nicht so leicht am Doppelmaterial, was eine zuverlässige Trennung gewährleistet.

Die hohe Temperaturbeständigkeit beruht auf dem hohen Schmelzpunkt von Wolfram und der Stabilität von Silber. Die Legierung behält ihre strukturelle Integrität auch bei extremen Temperaturen. Die Korrosionsbeständigkeit wird durch die Oxidationsbeständigkeit von Wolfram und die chemische Stabilität von Silber gewährleistet. Optimierte Sintern reduziert die Porosität und verbessert die Leistung in schwefelhaltigen oder feuchten Umgebungen. Nichtmagnetische Eigenschaften vermeiden elektromagnetische Störungen und ermöglichen die präzise Steuerung von Hochspannungssystemen. Die Optimierung der Mikrostruktur verbessert die Leistung zusätzlich, eine dichte Struktur reduziert Defekte und Nanopulver verfeinert die Körnung und verbessert die Konsistenz. Zu den Optimierungsansätzen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gehört die Entwicklung funktionaler Gradientendesigns oder Korrosionsschutzbeschichtungen, um höheren Strom- und Umweltaanforderungen gerecht zu werden.

### 6.1.3 Anwendung von Relais und offenen Leistungsschaltern

Die Verwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in Relais und Leistungsschaltern unterstreicht ihre Vielseitigkeit im elektrischen Bereich. Die hohe Leitfähigkeit und Lichtbogenbeständigkeit der Legierung erfüllen die Anforderungen dieser Geräte an Zuverlässigkeit und Langlebigkeit und finden breite Anwendung in der industriellen Steuerung und im Leistungsschutz.

In Relais wird die Silber-Wolfram-Legierung für bewegliche und statische Kontakte verwendet, die für eine schnelle Reaktion auf Stromänderungen verantwortlich ist. Häufiges Schalten von Relais erzeugt winzige Lichtbögen. Die hohe Härte und Lichtbogenerosionsbeständigkeit der Legierung verlängern die Lebensdauer der Kontakte, und die Silberphase gewährleistet eine widerstandsarme Signalübertragung. Die nichtmagnetischen Eigenschaften vermeiden elektromagnetische Störungen und eignen sich für elektromagnetisch sensible Umgebungen wie automatisierte Steuerungssysteme. Nach der Optimierung der Mikrostruktur bleiben die Kontakte auch im Hochfrequenzbetrieb stabil.

In Luftschaltern wird eine Silber-Wolfram-Legierung in Hauptkontakten und Lichtbogenisulationskontakten verwendet, um Ströme von Hunderten bis Tausenden Ampere zu trennen. Die Hauptkontakte nutzen die Leitfähigkeit und Verschleißfestigkeit der Legierung, um effizientes Schalten zu gewährleisten, während die Lichtbogenisulationskontakte durch die hochschmelzende Wolframphase starken Lichtbogenerosionen standhalten. Die Legierung weist eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit in Luftumgebungen auf und eignet sich für Außen- und Industrieanwendungen. Im praktischen Einsatz verlängert sich die Lebensdauer der Luftschalterkontakte deutlich und der Wartungsaufwand reduziert sich. Zu den Anwendungsvorteilen zählen hohe Zuverlässigkeit, lange Lebensdauer und Umweltverträglichkeit. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses zur Ausgewogenheit von Leitfähigkeit und Haltbarkeit oder die Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit durch Oberflächenbehandlung.

#### 6.1.3.1 Funktionsprinzip des Relais und Anforderungen an Kontaktmaterialien

Relais steuern das Ein- und Ausschalten von Stromkreisen durch elektromagnetische Prinzipien. Das Funktionsprinzip basiert auf der Aktivierung der Spule, wodurch ein Magnetfeld erzeugt wird. Dadurch wird der bewegliche Kontakt mit dem statischen Kontakt verbunden oder von diesem getrennt, um ein Signal- oder Stromschalten zu ermöglichen. Die Leistung hängt von der Zuverlässigkeit und Haltbarkeit des Kontaktmaterials ab, das besondere Anforderungen an das Material stellt.

Das Funktionsprinzip besteht darin, dass bei eingeschalteter Spule das Magnetfeld den Anker anzieht, der bewegliche und der statische Kontakt geschlossen werden und der Stromkreis geschlossen ist. Bei ausgeschalteter Stromversorgung verschwindet das Magnetfeld, der bewegliche Kontakt wird durch die Feder getrennt und der Stromkreis unterbrochen. Bei häufigem Betrieb entstehen winzige Lichtbögen,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und die Kontaktpunkte müssen mechanischen Stößen und thermischen Einflüssen standhalten. Relais werden häufig in Automatisierungssteuerungen und Haushaltsgeräten eingesetzt. Die Arbeitsumgebung kann Feuchtigkeit oder elektromagnetischen Störungen ausgesetzt sein.

Die Anforderungen an Kontaktmaterialien umfassen eine hohe Leitfähigkeit, um einen niederohmigen Pfad zu gewährleisten und eine effiziente Signalübertragung zu unterstützen. Die Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion ist entscheidend, da winzige Lichtbögen das Material verbrennen können und bei hohen Temperaturen stabil bleiben müssen. Härte und Verschleißfestigkeit verhindern mechanischen Kontaktverschleiß und verlängern die Lebensdauer. Antihafteigenschaften verhindern das Anhaften der Kontakte und gewährleisten eine zuverlässige Trennung. Die Korrosionsbeständigkeit passt sich feuchten oder schwefelhaltigen Umgebungen an und verhindert, dass Oxidation die Leitfähigkeit beeinträchtigt. Nichtmagnetische Eigenschaften vermeiden elektromagnetische Störungen und gewährleisten eine präzise Steuerung. Mikrostrukturelle Konsistenz reduziert lokale Ausfälle, und Prozessoptimierung ist eine notwendige Voraussetzung.

Diese Anforderungen gewährleisten gemeinsam die hohe Effizienz und lange Lebensdauer des Relais, und die Silber-Wolfram-Legierung muss diese Anforderungen durch Leistungsanpassung erfüllen.

#### 6.1.3.2 Anwendungseffekte von Silber-Wolfram-Legierungen in Relais

Die Anwendungswirkung der Silber-Wolfram-Legierung in Relais ist bemerkenswert und ihre Leistungsvorteile kommen in den beweglichen und statischen Kontakten voll zum Tragen, erfüllen die Anforderungen des Hochfrequenzbetriebs und elektromagnetisch empfindlicher Umgebungen und verbessern die Zuverlässigkeit der Geräte.

Die hohe Leitfähigkeit der Silberphase sorgt für einen niederohmigen Pfad, der eine effiziente Signalübertragung gewährleistet und die Anforderungen an eine schnelle Reaktion von Relais erfüllt. Der hohe Schmelzpunkt und die Härte von Wolfram verhindern Mikrolichtbogenerosion und verlängern die Lebensdauer der Kontakte, insbesondere bei hochfrequenten Schaltvorgängen. Die Antihafteffekte werden durch die Optimierung des Wolframskeletts und der Silberbenetzung erreicht. Die Kontakte verkleben bei mechanischem Kontakt oder Lichtbogeneinwirkung nicht so leicht, was eine zuverlässige Trennung gewährleistet. Die nichtmagnetischen Eigenschaften vermeiden elektromagnetische Störungen und eignen sich für Automatisierungssteuerungen und Kommunikationsgeräte.

Die Legierung mit optimierter Mikrostruktur bleibt auch in feuchter Umgebung stabil. Die dichte Struktur reduziert das Eindringen korrosiver Medien und ist korrosionsbeständiger als die von Kontakten aus reinem Silber. In der Praxis bewähren sich Kontakte aus Silber-Wolfram-Legierung in Industrirelais und Haushaltsgeräteschutzvorrichtungen gut und haben eine um ein Vielfaches längere Lebensdauer als herkömmliche Materialien. Tests zeigen, dass Oberflächenschäden nach Hochfrequenzbetrieb deutlich reduziert sind und die Leitfähigkeit konstant bleibt. Zu den Optimierungsmöglichkeiten gehören die Anpassung des Silber- Wolfram-Verhältnisses zur Verbesserung der Leitfähigkeit oder die Verfeinerung der Körner durch Nanopulver zur Verbesserung der Lichtbogenbeständigkeit. Die Anwendung der Silber-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolfram-Legierung in Relais bietet zuverlässige Unterstützung für deren Anwendung im Bereich der elektrischen Steuerung.

### 6.1.3.3 Leistungsanforderungen an Luftschalter und Kompatibilität der Silber-Wolfram-Legierung

Luftschalter nutzen Luft als Lichtbogenlöschmittel zum Trennen des Stromkreises. Die Leistungsanforderungen konzentrieren sich auf hohe Strombelastbarkeit, Lichtbogenerosionsbeständigkeit und Langzeitstabilität. Die Eigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung erfüllen diese Anforderungen optimal und bieten ein hervorragendes Anwendungspotenzial. Zu den Leistungsanforderungen gehören eine hohe Leitfähigkeit, die Unterstützung der Stromübertragung von Hunderten bis Tausenden Ampere und die Reduzierung der Widerstandswärme. Lichtbogenerosionsbeständigkeit ist der Kern. Das Abschalten hoher Ströme erzeugt starke Lichtbögen, die Hochtemperaturablation standhalten müssen. Härte und Verschleißfestigkeit gewährleisten, dass die Kontakte mechanischen Stößen und häufiger Betätigung standhalten. Antihafteigenschaften verhindern das Anhaften der Kontakte und gewährleisten eine zuverlässige Trennung. Hohe Temperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit passen sich der Industrielatmosphäre oder Außenumgebung an und verlängern die Lebensdauer.

Die Konsistenz der Mikrostruktur reduziert lokale Ausfälle, und Prozessoptimierung ist der Schlüssel. Die Anpassungsfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung zeigt sich in der hohen Leitfähigkeit der Silberphase, die den Anforderungen an die Stromübertragung gerecht wird. Der hohe Schmelzpunkt und die Härte von Wolfram widerstehen starker Lichtbogenerosion und verlängern die Kontaktlebensdauer deutlich. Die Wärmeleitfähigkeit von Silber leitet Wärme ab, und die Antihafte Wirkung wird durch die Optimierung des Wolframskeletts erreicht, das für die Trennung bei hohen Strömen geeignet ist. Die Oxidationsbeständigkeit von Wolfram und die Stabilität von Silber erhöhen die Korrosionsbeständigkeit, und die dichte Mikrostruktur reduziert Defekte, was für feuchte oder schwefelhaltige Umgebungen geeignet ist. In der Praxis bewähren sich Kontakte aus Silber-Wolfram-Legierungen in Luftschaltern, insbesondere in der industriellen Stromverteilung und im Gebäudeschutz, mit verlängerten Wartungsintervallen. Zu den Optimierungsansätzen gehören die Entwicklung eines funktionalen Gradientendesigns zur Verbesserung der lokalen Leistung oder die Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit durch Oberflächenbeschichtung. Die Anpassungsfähigkeit der Silber-Wolfram-Legierung bietet eine solide Grundlage für ihre breite Anwendung in Luftleistungsschaltern.

### 6.1.4 Anwendung in Trennschaltern und Erdungsschaltern

Die Verwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in Trennschaltern und Erdungsschaltern spiegelt ihre wichtige Rolle in Hochspannungsgeräten wider. Diese Schalter dienen der sicheren Trennung und Erdung von Stromkreisen. Die hohe Leitfähigkeit, Lichtbogenbeständigkeit und Langlebigkeit der Silber-Wolfram-Legierung machen sie zu einem idealen Werkstoff. Der Einsatz der Legierung in diesen Komponenten verbessert die Sicherheit und Betriebsstabilität der Geräte, insbesondere im Außenbereich oder in industriellen Umgebungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



#### 6.1.4.1 Funktion und Werkstoffanforderungen an Trennschalter und Erdungsschalter

Trenn- und Erdungsschalter erfüllen kritische Funktionen in Energiesystemen und stellen besondere Anforderungen an die Materialleistung, um einen sicheren Betrieb und langfristige Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Funktionen und Anforderungen bestimmen maßgeblich die Materialauswahl und -optimierung.

Die Funktion des Trennschalters besteht darin, den Stromkreis ohne Laststrom zu trennen, einen sichtbaren Trennpunkt bereitzustellen und das Risiko eines Stromschlags bei Fehlbedienung oder Wartung zu verhindern. Der Erdungsschalter dient dazu, das Gerät oder die Leitung zu erden, die Restladung abzulassen und die Sicherheit von Personal und Gerät zu gewährleisten. Beide arbeiten in einer Hochspannungsumgebung und können Lichtbögen, mechanischen Stößen und extremen Wetterbedingungen ausgesetzt sein.

Zu den Materialanforderungen gehört eine hohe Leitfähigkeit, um einen niederohmigen Pfad zu gewährleisten, die Stromübertragung zu unterstützen und thermische Effekte zu reduzieren. Lichtbogenerosionsbeständigkeit ist von zentraler Bedeutung. Beim Trennen oder Verbinden können Lichtbögen entstehen, und Hochtemperaturablation muss beständig sein. Härte und Verschleißfestigkeit widerstehen mechanischem Verschleiß und häufiger Betätigung und verlängern so die Lebensdauer. Antihafteigenschaften verhindern Kontakthaftung und gewährleisten einen zuverlässigen Betrieb. Korrosionsbeständigkeit und Witterungsbeständigkeit eignen sich für Außenumgebungen wie Regen, UV-Strahlung oder Industriemmosphäre. Nichtmagnetische Eigenschaften vermeiden elektromagnetische Störungen, mikrostrukturelle Konsistenz reduziert lokale Ausfälle, und Prozessoptimierung ist eine notwendige Voraussetzung.

Diese Anforderungen gewährleisten die Sicherheit und Haltbarkeit von Trenn- und Erdungsschaltern, und die Silber-Wolfram-Legierung muss diese Anforderungen durch Leistungsanpassung erfüllen.

#### 6.1.4.2 Vorteile der Silber-Wolfram-Legierung in Trennschaltern und Erdungsschaltern

Die Vorteile der Silber-Wolfram-Legierung in Trenn- und Erdungsschaltern liegen in ihrer hervorragenden Leistungskombination, insbesondere in ihrer Leistungsfähigkeit unter Hochspannung und im Außenbereich, die die Zuverlässigkeit der Geräte deutlich verbessert. Das Silberphasennetzwerk sorgt für eine hohe Leitfähigkeit. Die hohe Elektronendichte des Silbers sorgt für einen niederohmigen Pfad, unterstützt eine effiziente Stromübertragung und reduziert den Energieverlust in Trenn- und Erdungsschaltern. Der hohe Schmelzpunkt und die Härte des Wolframs verleihen der Legierung eine hervorragende Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion. Der beim Trennen oder Verbinden entstehende Lichtbogen kann die Kontakte nur schwer zum Schmelzen bringen, was die Lebensdauer verlängert. Tatsächliche Tests zeigen, dass die Oberflächenschädigung von Kontakten aus Silber-Wolfram-Legierungen durch Lichtbogeneinwirkung deutlich geringer ist als bei kupferbasierten Materialien. Die Härte und Verschleißfestigkeit werden durch Wolframpartikel unterstützt. Die Legierung widersteht mechanischen Stößen und Verschleiß durch häufigen Betrieb und ist für Vibrationen und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Witterungseinflüsse im Außenbereich geeignet. Die Duktilität von Silber puffert Spannungen, und die Haltbarkeit des Kontakts wird durch die Optimierung der Mikrostruktur verbessert. Die Antihafte Wirkung wird durch die Optimierung des Wolframskeletts und der Silberbenetzung erreicht. Der Kontakt haftet während des Betriebs nicht so leicht am Doppelmaterial, was eine zuverlässige Trennung gewährleistet.

Korrosions- und Witterungsbeständigkeit sind Vorteile für Außenanwendungen. Die Oxidationsbeständigkeit von Wolfram und die Stabilität von Silber schützen vor Korrosion bei Regen, UV-Strahlung oder in industriellen Umgebungen. Die dichte Mikrostruktur reduziert die Porosität und verringert das Eindringen korrosiver Medien. Die optimierte Sinterlegierung eignet sich hervorragend für Küsten- und Industriegebiete. Die nichtmagnetischen Eigenschaften vermeiden elektromagnetische Störungen und gewährleisten eine präzise Steuerung von Hochspannungsgeräten. In der Praxis bewähren sich Kontakte aus Silber-Wolfram-Legierungen in Hochspannungstrennschaltern und Erdungsschaltern, insbesondere in Übertragungsleitungen und Umspannwerken, wo Wartungsintervalle verlängert und die Sicherheit verbessert werden. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses zur Verbesserung der Witterungsbeständigkeit oder die weitere Leistungssteigerung durch Korrosionsschutzbeschichtungen. Die Anwendungsvorteile der Silber-Wolfram-Legierung bilden eine solide Grundlage für ihren breiten Einsatz in Trennschaltern und Erdungsschaltern.

## 6.2 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in der Elektronik

Silber-Wolfram-Legierungen werden aufgrund ihrer hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Verschleißfestigkeit häufig in der Elektronik eingesetzt, insbesondere in der elektrischen Verarbeitung, bei Wärmeableitungskomponenten und Steckverbindern. Ihre Mikrostruktur sowie ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften ermöglichen die Anpassung an die Anforderungen hochpräziser und hochtemperierter Umgebungen und verbessern die Zuverlässigkeit und Leistung elektronischer Geräte.

### 6.2.1 Leistungsanforderungen und Anwendungen von EDM-Elektroden

Als Elektrodenmaterial für die Elektrobearbeitung eignet sich die Silber-Wolfram-Legierung gut für die Funkenerosion (EDM) und die elektrochemische Bearbeitung (ECM). Ihre Leistung wirkt sich direkt auf die Bearbeitungsgenauigkeit, Effizienz und Lebensdauer der Elektroden aus. Elektroden für die Elektrobearbeitung dienen zum Abtragen von Metallen und erreichen durch Lichtbogen- oder elektrochemische Reaktionen eine hochpräzise Formgebung. Die Leitfähigkeit und Verschleißfestigkeit der Legierung sind entscheidend.

#### 6.2.1.1 Leistungsindexanforderungen an Elektrodenmaterialien für die Elektrobearbeitungstechnologie

Der Elektrobearbeitungsprozess stellt hohe Anforderungen an den Leistungsindex der Elektrodenmaterialien, um die Verarbeitungsqualität und die Langlebigkeit der Geräte sicherzustellen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Leistungsindex wirkt sich direkt auf die Verarbeitungseffizienz, die Oberflächenqualität und den Elektrodenverlust aus und muss an den jeweiligen Prozess angepasst werden.

Eine hohe Leitfähigkeit ist eine Grundvoraussetzung. Die Elektrode muss einen niederohmigen Pfad bieten, um eine effiziente Stromübertragung zu gewährleisten und Energieverluste zu reduzieren. Beim Funkenerosionsschweißen ist die Stromdichte hoch, und eine unzureichende Leitfähigkeit kann zu Lichtbogeninstabilität führen und die Bearbeitungsgenauigkeit beeinträchtigen. Die Widerstandsfähigkeit gegen Lichtbogenerosion ist entscheidend. Die hohe Temperatur des Lichtbogens kann das Elektrodenmaterial schmelzen oder verdampfen lassen und muss daher bei hoher Energiedichte stabil bleiben. Härte und Verschleißfestigkeit widerstehen mechanischem Verschleiß und Lichtbogeneinwirkung und verlängern die Lebensdauer der Elektrode, insbesondere bei wiederholter Bearbeitung.

Die Antihafwirkung verhindert das Festkleben der Elektrode am Werkstück und gewährleistet die Kontinuität des Bearbeitungsprozesses. Die hohe Temperaturbeständigkeit gleicht die lokal durch den Lichtbogen erzeugte hohe Temperatur aus und verhindert Materialverformungen oder -versagen. Die Korrosionsbeständigkeit bewältigt die chemische Erosion im Elektrolyten oder in der Bearbeitungsumgebung und erhält die Integrität der Elektrodenoberfläche. Die mikrostrukturelle Konsistenz reduziert lokale Verluste und optimiert die Materialvorbereitung als notwendige Voraussetzung. Diese Indikatoren tragen gemeinsam zu einer hohen Effizienz und Präzision der Elektrobearbeitung bei, und die Elektrodenmaterialien müssen diese Anforderungen durch Leistungsoptimierung erfüllen.

#### 6.2.1.2 Leistungsvorteile der Silber-Wolfram-Legierung als Elektrode für die Elektrobearbeitung

für die Elektrobearbeitung deutliche Leistungsvorteile. Der synergistische Effekt der Silber- und Wolframphase erfüllt die Anforderungen an hohe Präzision und Haltbarkeit und verbessert die Bearbeitungseffizienz.

Das Silberphasennetzwerk sorgt für hohe Leitfähigkeit. Die hohe Elektronendichte des Silbers sorgt für einen niederohmigen Pfad, unterstützt eine effiziente Stromübertragung und reduziert die Lichtbogeninstabilität. Der hohe Schmelzpunkt und die Härte von Wolfram verleihen der Legierung eine hervorragende Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion. Das Wolframgerüst bleibt auch bei hohen Lichtbogentemperaturen stabil, und die Wärmeleitfähigkeit der Silberphase leitet Wärme schnell ab und reduziert den Elektrodenverlust. Tests zeigen, dass die Verlustrate von Elektroden aus Silber-Wolfram-Legierungen beim Funkenerosionsschweißen geringer ist als die von Kupferelektroden.

Wolframpartikel unterstützen Härte und Verschleißfestigkeit. Die Legierung widersteht Lichtbogeneinwirkung und mechanischem Verschleiß und verlängert so die Lebensdauer der Elektrode. Die Duktilität des Silbers gleicht Spannungen aus, und die Haltbarkeit wird durch die Optimierung der Mikrostruktur erhöht. Die Antihafwirkung wird durch die geringe Adhäsionseigenschaft des Wolframs

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und die optimierte Benetzung des Silbers erreicht. Die Elektrode haftet nicht leicht am Werkstück, was die Kontinuität der Bearbeitung gewährleistet.

Die hohe Temperaturbeständigkeit ist auf den hohen Schmelzpunkt von Wolfram zurückzuführen. Die Legierung behält ihre strukturelle Integrität auch bei den lokal hohen Temperaturen des Lichtbogens. Die Korrosionsbeständigkeit wird durch die Oxidationsbeständigkeit von Wolfram und die Stabilität von Silber gewährleistet. Das optimierte Sintern reduziert die Porosität und passt sich der Elektrolytumgebung an. Die Mikrostruktur dichte reduziert Defekte, und das Nanopulver verfeinert die Körner und verbessert die Konsistenz.

In der Praxis eignen sich Elektroden aus Silber-Wolfram-Legierungen gut für die Bearbeitung von Präzisionsformen und komplexen Teilen. Ihre Bearbeitungsgenauigkeit und Oberflächenqualität sind herkömmlichen Materialien überlegen. Optimierungsmöglichkeiten bestehen beispielsweise in der Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses zur Verbesserung der Leitfähigkeit oder in der weiteren Reduzierung von Verlusten durch Oberflächenbeschichtungen.

#### 6.2.1.3 Auswahl von Elektroden aus Silber-Wolfram-Legierungen in verschiedenen EDM-Szenarien

Die Auswahl der Elektroden aus Silber-Wolfram-Legierung muss entsprechend den Prozessanforderungen und Werkstückeigenschaften des Szenarios der elektrischen Bearbeitung optimiert werden, und das Silber-Wolfram-Verhältnis und die Mikrostruktur sollten angepasst werden, um unterschiedliche Anwendungsanforderungen zu erfüllen.

Beim elektromechanischen Bearbeiten (EDM) werden Silber-Wolfram-Legierungen mit hohem Wolframanteil (z. B. 70 % W, 30 % Ag) verwendet. Sie weisen eine hohe Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion auf und eignen sich für die Bearbeitung hochschmelzender Metalle wie Titanlegierungen oder Stahl. Geringe Verluste und eine lange Lebensdauer sind Vorteile, die für die Bearbeitung von Präzisionsformen und komplexen geometrischen Formen vorteilhaft sind. Ein optimierter Sinterprozess verfeinert die Körnung und erhöht die Haltbarkeit. Beim elektrolytischen Bearbeiten (ECM) werden Silber-Wolfram-Legierungen mit hohem Silberanteil (z. B. 30 % W, 70 % Ag) verwendet. Sie weisen eine ausgezeichnete Leitfähigkeit auf und eignen sich für großflächiges elektrolytisches Ablösen. Das Silberphasennetzwerk unterstützt eine effiziente Stromverteilung, während das Wolframskelett mechanischen Halt bietet und sich an die kontinuierliche Bearbeitung anpasst. Oberflächenpolitur reduziert Korrosion und optimiert die Mikrostruktur zur Verbesserung der Stabilität. Beim mikroelektromechanischen Bearbeiten werden nanoskalige Silber-Wolfram-Legierungen verwendet. Sie zeichnen sich durch feine Körnung und hohe mikrostrukturelle Konsistenz aus und eignen sich für Mikroteile und die hochpräzise Bearbeitung. Die Leistung hinsichtlich geringer Verluste und Antihafwirkung ist hervorragend und die Optimierungsrichtung umfasst ein funktionales Gradientendesign, um Leitfähigkeit und Verschleißfestigkeit auszugleichen. In der Praxis bewähren sich Elektroden aus Silber-Wolfram-Legierungen bei der Bearbeitung von Flugzeugteilen und elektronischen Bauteilen. Die Auswahl erfolgt anhand von Prozessparametern und Werkstückmaterialien. Die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Optimierungsrichtung umfasst die Entwicklung eines intelligenten Auswahlsystems zur Verbesserung der Anpassungsfähigkeit.

## 6.2.2 Rolle mikroelektronischer Materialien

Silber-Wolfram-Legierungen spielen eine Schlüsselrolle in der Mikroelektronik, insbesondere bei Verpackungs- und Verbindungskomponenten. Ihre hohe Leitfähigkeit und ihr gutes Wärmemanagement unterstützen die Leistungsanforderungen hochdichter integrierter Schaltkreise. Die optimierte Mikrostruktur der Legierung erfüllt die Anforderungen an Präzision im Mikrometerbereich und trägt dem Trend zur Miniaturisierung und hohen Effizienz moderner elektronischer Geräte Rechnung.

### 6.2.2.1 Präzisionsanforderungen an Werkstoffe in der Mikroelektronik

Die Mikroelektronik stellt extrem hohe Anforderungen an die Präzision von Materialien, um die Herstellung und den Betrieb von Mikrokomponenten zu unterstützen und die Effizienz und Zuverlässigkeit der Geräte zu gewährleisten. Die Präzisionsanforderungen wirken sich direkt auf die Leistung von Gehäuse und Verbindungen aus und müssen durch die Materialeigenschaften erfüllt werden.

Maßgenauigkeit ist eine zentrale Anforderung. Materialien müssen im Mikrometer- oder sogar Nanometerbereich verarbeitet und montiert werden, um sich an die feine Struktur von Chips und Leiterplatten anzupassen. Die elektrische Leitfähigkeit muss extrem hoch sein, um eine effiziente Signalübertragung zu gewährleisten und widerstandsbedingte Signalverluste zu reduzieren. Die Wärmeleitfähigkeit ist der Schlüssel zum Wärmemanagement. Mikroelektronische Geräte erzeugen bei hoher Dichte viel Wärme, und die Materialien müssen die Wärme schnell ableiten, um Überhitzung und Ausfälle zu vermeiden.

Hohe mechanische Stabilität ist erforderlich. Das Material muss Belastungen durch leichte Vibrationen und Wärmeausdehnung standhalten, um die strukturelle Integrität langfristig zu erhalten. Die Korrosionsbeständigkeit hält Feuchtigkeit und Chemikalien in der Verpackungsumgebung stand und verhindert so Leistungseinbußen. Mikrostrukturelle Konsistenz reduziert lokale Defekte und gewährleistet einheitliche elektrische und thermische Eigenschaften. Niedrige magnetische Eigenschaften vermeiden elektromagnetische Störungen und eignen sich für hochempfindliche elektronische Bauteile. Diese Anforderungen haben die Entwicklung hochpräziser Materialien gefördert, und die Silber-Wolfram-Legierung muss durch Vorbereitung optimiert werden, um den Anforderungen der Mikroelektronik gerecht zu werden.

### 6.2.2.2 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in mikroelektronischen Gehäusen

Silber-Wolfram-Legierungen werden häufig in mikroelektronischen Gehäusen verwendet. Ihre Wärmeleitfähigkeit und Dimensionsstabilität unterstützen das Wärmemanagement und die strukturelle Zuverlässigkeit von Hochleistungschips und verbessern die Gehäuseeffizienz. Eine Silber-Wolfram-Legierung wird als Verpackungssubstrat verwendet. Die Wärmeleitfähigkeit wird durch das

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Silberphasennetzwerk gewährleistet, das die beim Chipbetrieb entstehende Wärme schnell ableitet und lokale Überhitzung verhindert. Der hohe Schmelzpunkt und der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient von Wolfram gewährleisten Dimensionsstabilität, entsprechen den Wärmeausdehnungseigenschaften von Siliziumchips und reduzieren die Verpackungsspannung. Nach der Optimierung der Mikrostruktur weist die Legierung eine hohe Dichte, geringe Porosität und verbesserte mechanische Festigkeit auf und eignet sich für hochdichte Verpackungen.

In Leistungshalbleitergehäusen werden Substrate aus Silber-Wolfram-Legierungen zur Unterstützung von MOSFETs und IGBTs verwendet. Sie weisen eine bessere Wärmeleitfähigkeit als herkömmliche Keramiksubstrate auf und verbessern die Wärmeableitungseffizienz um mehr als 30 %. Nanopulver verfeinern die Körnung, verbessern die Wärmeleitfähigkeit und eignen sich für Hochleistungsanwendungen. Die Oberflächenebenheit wird durch Präzisionspolitur erreicht, um die Montageanforderungen im Mikrometerbereich zu erfüllen.

In der Praxis bewährt sich die Silber-Wolfram-Legierung in 5G-Chips und Steuermodulen für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben und bietet signifikante Effekte beim Wärmemanagement. Optimierungsansätze umfassen die Entwicklung funktional abgestufter Materialien, die Abstimmung von Wärmeleitfähigkeit und Kosten oder die Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit durch Beschichtungen.

#### 6.2.2.3 Die Rolle der Silber-Wolfram-Legierung in mikroelektronischen Verbindungskomponenten

Silber-Wolfram-Legierungen spielen eine wichtige Rolle in mikroelektronischen Verbindungskomponenten. Ihre hohe Leitfähigkeit und Verschleißfestigkeit unterstützen die Zuverlässigkeit der Signalübertragung und der mechanischen Verbindung und tragen dem Trend zur Miniaturisierung Rechnung. Silber-Wolfram-Legierungen werden zur Verbindung von Leitungen und Kontakten verwendet. Die hohe Leitfähigkeit der Silberphase gewährleistet eine widerstandsarme Signalübertragung und erfüllt die Anforderungen der Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung. Die hohe Härte von Wolfram widersteht mechanischem Verschleiß und verlängert die Lebensdauer von Verbindungskomponenten, insbesondere bei häufigem Stecken und Trennen.

Die kompakte Mikrostruktur reduziert die Porosität, erhöht die Korrosionsbeständigkeit und eignet sich für feuchte oder industrielle Umgebungen. In Mikrosteckverbindern unterstützen Kontakte aus Silber-Wolfram-Legierung USB-C- und HDMI-Schnittstellen. Sie weisen eine bessere Leitfähigkeit und Verschleißfestigkeit als Kupferlegierungen auf und reduzieren den Kontaktwiderstand um 20 %. Nanoskalige Legierungen verfeinern Korngrößen, verbessern die mechanische Stabilität und reduzieren den Steckerverschleiß. Nichtmagnetische Eigenschaften vermeiden elektromagnetische Störungen und eignen sich für die Hochfrequenz-Signalübertragung. In der Praxis überzeugen Verbindungskomponenten aus Silber-Wolfram-Legierungen in Smartphones und IoT-Geräten mit hoher Signalintegrität und langer Lebensdauer. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses zur Verbesserung der Leitfähigkeit oder die Verbesserung der Antioxidationseigenschaften durch Oberflächenbehandlung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 6.2.3 Anwendungsforschung in der Sensorik

Der Einsatz von Silber-Wolfram-Legierungen in Sensoren hat sein Potenzial in leistungsstarken elektronischen Geräten bewiesen, insbesondere in Szenarien, die hohe Leitfähigkeit und Haltbarkeit erfordern. Die optimierte Mikrostruktur der Legierung macht sie an verschiedene Sensorumgebungen anpassbar, unterstützt die Anforderungen an Signalübertragung und strukturelle Stabilität und eröffnet neue Wege für die Entwicklung der Sensortechnologie.

#### 6.2.3.1 Anforderungen an die Arbeitsumgebung des Sensors und die Materialeistung

Die Arbeitsumgebung von Sensoren ist komplex und vielfältig und beinhaltet extreme Temperaturen, mechanische Belastungen und chemische Korrosion. Dies stellt besondere Anforderungen an die Materialeigenschaften, um die Genauigkeit und langfristige Zuverlässigkeit der Sensoren zu gewährleisten. Die Umgebung und die Anforderungen beeinflussen direkt die Materialauswahl und -optimierung.

Zu den Arbeitsumgebungen zählen Hochtemperaturumgebungen, wie z. B. Automotoren oder Industrieöfen, in denen die Temperaturen 200 °C übersteigen können, und Tieftemperaturumgebungen, wie z. B. in der Luftfahrt, in denen die Temperaturen unter -50 °C fallen. Mechanische Vibrationen und Stöße sind in der industriellen Überwachung oder in mobilen Geräten häufig, und feuchte oder korrosive Gasumgebungen, wie z. B. im Meer oder in Chemieanlagen, können den Materialabbau beschleunigen. Elektromagnetische Störungen sind bei der Hochfrequenzsignalübertragung unvermeidlich, und ultraviolettes Licht oder Strahlung beeinträchtigt die Materialstabilität bei Außenanwendungen.

Zu den Anforderungen an die Materialeistung gehören eine hohe Leitfähigkeit für eine effiziente Signalübertragung und die Reduzierung von widerstandsbedingtem Rauschen. Hohe und niedrige Temperaturbeständigkeit ermöglichen die Anpassung an extreme Umgebungen und verhindern, dass das Material bei Temperaturschwankungen seine Leistung verliert. Mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit gewährleisten Vibrationen und Stößen und verlängern so die Sensorlebensdauer. Korrosionsbeständigkeit gewährleistet den Umgang mit feuchten oder chemischen Medien und sorgt für die Aufrechterhaltung der elektrischen Leistung. Ein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient passt zu den Sensorelementen und reduziert thermische Belastungen. Nichtmagnetische Eigenschaften zur Vermeidung elektromagnetischer Störungen, mikrostrukturelle Konsistenz zur Reduzierung lokaler Defekte und eine optimierte Vorbereitung sind entscheidend.

#### 6.2.3.2 Mögliche Anwendungsszenarien der Silber-Wolfram-Legierung in Sensoren

Die potenziellen Anwendungsszenarien der Silber-Wolfram-Legierung in Sensoren basieren auf ihren hervorragenden Eigenschaften, insbesondere in Bezug auf Leitfähigkeit, Haltbarkeit und Umwelanpassungsfähigkeit, was Möglichkeiten für die Entwicklung von Temperatur-, Druck- und Dehnungssensoren bietet. In Hochtemperatursensoren wird die Silber-Wolfram-Legierung für Kontaktteile von Thermoelementen oder Infrarotsensoren verwendet. Die hohe Leitfähigkeit der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Silberphase gewährleistet die Signalübertragung. Der hohe Schmelzpunkt und die hohe Temperaturbeständigkeit von Wolfram halten Temperaturen über 200 °C stand. Nach der Optimierung der Mikrostruktur weist die Legierung eine hohe Dichte und einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten auf, wodurch sie perfekt zum Keramiksubstrat passt und thermische Spannungen reduziert. Tests zeigen, dass die Legierung auch bei hohen Temperaturen stabil bleibt und sich für die Überwachung von Flugzeugtriebwerken eignet. In Drucksensoren dient die Silber-Wolfram-Legierung als leitfähiger Film oder Kontakt. Ihre Härte und Verschleißfestigkeit widerstehen mechanischen Stößen und verlängern die Lebensdauer. Die Wärmeleitfähigkeit von Silber leitet lokale Wärme ab, und das Wolframskelett bietet mechanischen Halt, was für industrielle Hydrauliksysteme geeignet ist. Optimiertes Sintern reduziert die Porosität und erhöht die Korrosionsbeständigkeit, was für die Drucküberwachung in der Meeresumwelt von Vorteil ist. In Dehnungssensoren wird die Silber-Wolfram-Legierung für Leiterbahnen verwendet. Ihre nichtmagnetischen Eigenschaften vermeiden elektromagnetische Störungen und eignen sich daher für die Erfassung hochfrequenter Signale.

### 6.3 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in der Luft- und Raumfahrt

Silber-Wolfram-Legierungen erfreuen sich aufgrund ihrer hohen Dichte, ihres hohen Schmelzpunkts und ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften großer Beliebtheit in der Luft- und Raumfahrt. Sie werden häufig in Feststoffraketen Düsen, Gegengewichten und Wärmeschutzsystemen eingesetzt. Ihre Mikrostruktur und physikalischen Eigenschaften ermöglichen die Anpassung an extreme Umgebungen und unterstützen den zuverlässigen Betrieb und die Leistungssteigerung von Raumfahrzeugen.

#### 6.3.1 Anwendung der Düsenhalsauskleidung für Feststoffraketen

Die Silber-Wolfram-Legierung in der Düsenauskleidung von Feststoffraketen beweist ihr Potenzial in Umgebungen mit hohen Temperaturen, hohem Druck und Korrosion. Als Kernkomponente der Düse muss die Düsenauskleidung extremen Bedingungen standhalten und ihre strukturelle Integrität bewahren. Die hohe Wärmeleitfähigkeit und Verschleißfestigkeit der Legierung bieten in diesem Bereich einzigartige Vorteile.

##### 6.3.1.1 Arbeitsumgebung und Materialherausforderungen bei der Auskleidung der Düsenhals von Feststoffraketen

Die Arbeitsumgebung der Düsenhalsauskleidung von Feststoffraketen ist äußerst rau und umfasst hohe Temperaturen, Hochgeschwindigkeitsgasströmungen und chemische Erosion, was eine große Herausforderung für die Materialeigenschaften darstellt und die Lebensdauer der Düse sowie die Raketenleistung direkt beeinflusst.

Die Arbeitsumgebung ist von hohen Temperaturen geprägt. Die Verbrennungsgastemperatur kann über 3000 °C erreichen, und die Auskleidung muss einem Temperaturschock standhalten. Der Hochgeschwindigkeitsgasstrom trifft mit Überschallgeschwindigkeit auf die Auskleidung, trägt Partikel mit sich und verursacht mechanischen Verschleiß und Erosion. Chemische Erosion wird durch

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Verbrennungsprodukte wie Chlorwasserstoff und Oxide verursacht, was den Materialabbau beschleunigt. Temperaturwechsel und mechanische Belastungen werden beim Start und Wiedereintritt verstärkt, und ultraviolette Strahlen und Strahlung beeinträchtigen die Materialstabilität im Weltraum zusätzlich.

Zu den Herausforderungen an das Material gehören hohe Temperaturbeständigkeit, da es Temperaturen über 3000 °C standhalten muss, ohne zu schmelzen oder sich zu verformen. Erosionsbeständigkeit gegen Hochgeschwindigkeitspartikel und chemische Korrosion zur Vermeidung von Oberflächenverlusten. Mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit gewährleisten die strukturelle Integrität und verlängern die Lebensdauer. Ein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient, passend zu anderen Düsenkomponenten, reduziert die thermische Belastung. Wärmeleitfähigkeit dient der Wärmeableitung und verhindert lokale Überhitzung. Mikrostrukturelle Konsistenz zur Reduzierung der Rissausbreitung und optimierte Vorbereitung sind entscheidend.

#### 6.3.1.2 Leistung der Silber-Wolfram-Legierung als Düsenhalsauskleidung

Silber-Wolfram-Legierungen eignen sich hervorragend als Düsenhalsauskleidung. Die synergistische Wirkung der Silber- und Wolframphase erfüllt die Anforderungen hoher Temperaturen und korrosiver Umgebungen und unterstützt den effizienten Betrieb von Raketen. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (3422 °C) sorgt für hohe Temperaturbeständigkeit. Die Legierung bleibt über 3000 °C strukturell stabil, und die Wärmeleitfähigkeit der Silberphase leitet die Wärme schnell ab, um lokales Schmelzen zu verhindern. Tests zeigen, dass die Verlustrate von Halsauskleidungen aus Silber-Wolfram-Legierungen in simulierten Hochtemperaturumgebungen geringer ist als die von Hartmetallwerkstoffen. Die Korrosionsbeständigkeit beruht auf der Härte und chemischen Beständigkeit von Wolfram. Der Oberflächenverschleiß wird bei Hochgeschwindigkeitsgasströmungen und Partikeleinwirkung reduziert, und die Benetzbarkeit von Silber verbessert die Grenzflächenhaftung.

Mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit werden durch das Wolframskelett gewährleistet. Die Legierung widersteht thermischen Zyklen und mechanischer Belastung und verlängert so die Lebensdauer der Düsenauskleidung. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient (ähnlich wie bei Keramikwerkstoffen) reduziert Spannungsungleichgewichte mit anderen Düsentteilen. Die optimierte Mikrostruktur weist eine hohe Dichte auf und reduziert die Rissausbreitung. Das Silbernetzwerk sorgt für Wärmeleitfähigkeit und gleichmäßige Wärmeverteilung, um Überhitzungsschäden zu vermeiden. In der Praxis bewähren sich Auskleidungen aus Silber-Wolfram-Legierungen in Feststoffraketen, insbesondere in Hochschubtriebwerken, durch eine deutlich verbesserte Haltbarkeit.

#### 6.3.1.3 Vorbereitung und Anwendungseffekt der Düsenhalsauskleidung aus Silber-Wolfram-Legierung

Die Düsenhalsauskleidung aus einer Silber-Wolfram-Legierung wird durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltration hergestellt. Der Herstellungsprozess und die Anwendungseffekte wirken sich direkt auf die Leistung und praktische Anwendung aus. Der Herstellungsprozess umfasst die Pulveraufbereitung, die Auswahl von hochreinem Wolfram- und Silberpulver sowie die Feineinstellung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Partikelgröße durch Hochenergie-Kugelmahlen, um eine gleichmäßige Formgebung zu gewährleisten. Das Pressformen erfolgt bei hohen Temperaturen und hohem Druck. Der Pressdruck wird auf mehrere hundert MPa eingestellt, wodurch die Dichte des Formkörpers hoch ist. Das Sintern erfolgt im Vakuum oder in einer inerten Atmosphäre, wobei die Temperatur knapp über dem Schmelzpunkt von Silber liegt. Das flüssige Silber benetzt die Wolframpartikel und füllt die Poren. Das poröse Wolframskelett wird durch Vakuuminfiltration hergestellt, und das geschmolzene Silber dringt ein und bildet eine dichte Struktur. Die anschließende Wärmebehandlung optimiert die Mikrostruktur.

Die Nutzungsdauer spiegelt sich in hoher Haltbarkeit und Leistungsstabilität wider. Die optimierte Kehlenauskleidung weist eine geringe Porosität und eine bessere Korrosionsbeständigkeit als herkömmliche Graphitwerkstoffe auf. Hochtemperaturtests zeigen, dass die Kehlenauskleidung Hunderte von Sekunden lang bei 3000 °C läuft und die Oberflächenschädigung nur ein Drittel der von Hartmetallwerkstoffen beträgt. Die mechanische Festigkeit hält mehreren thermischen Zyklen stand, und die Wärmeleitfähigkeit sorgt für eine gleichmäßige Wärmeverteilung und reduziert lokale Ausfälle. Bei realen Raketenstarts weist die Kehlenauskleidung aus Silber-Wolfram-Legierung einen geringen Schubverlust auf und ihre Lebensdauer ist 1,5-mal länger als bei herkömmlichen Materialien.

Zu den Optimierungsrichtungen gehören die Entwicklung von Mehrprozesskombinationen wie SPS+HIP oder die Verbesserung der Dichte durch Nanopulver. Die Herstellungs- und Nutzungseffekte liefern technische Unterstützung für die Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in Düsenhalsauskleidungen.

### 6.3.2 Einsatzmöglichkeiten von Flugzeugtriebwerkskomponenten

Die potenzielle Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in Triebwerkskomponenten für die Luft- und Raumfahrt spiegelt ihre Anpassungsfähigkeit an hohe Temperaturen und Drücke wider, insbesondere in Szenarien mit hohen Anforderungen an Wärmemanagement, strukturelle Unterstützung und Haltbarkeit. Die Wärmeleitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften der Legierung ermöglichen den Einsatz in wichtigen Triebwerkskomponenten für die Luft- und Raumfahrt und verbessern so die Effizienz und Lebensdauer des Triebwerks.

#### 6.3.2.1 Anforderungen an Werkstoffe im Hochtemperatur- und Hochdruck-Arbeitsumfeld von Flugzeugtriebwerken

Die hohe Temperatur- und Druckbelastung von Flugzeugtriebwerken ist äußerst komplex. Daher werden hohe Anforderungen an die Materialeistung gestellt, um die Zuverlässigkeit und Sicherheit des Triebwerks im Hochleistungsbetrieb zu gewährleisten. Die Umgebung und die Anforderungen bestimmen direkt die Materialauswahl und -optimierung.

Die Arbeitsumgebung umfasst Hochtemperaturbereiche, in denen die Temperaturen der Brennkammer und der Turbinenschaufeln 1500 °C bis 2000 °C erreichen können, die Temperatur der Auspuffdüsen ist sogar noch höher. In der Hochdruckumgebung kann der Arbeitsdruck mehrere zehn MPa erreichen, und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Gasströmungsrate ist Überschall, was zu mechanischer Belastung führt. Bei Start und Landung treten häufig thermische Zyklen auf, und Verbrennungsprodukte wie Kohlendioxid und Wasserdampf verursachen Oxidation und Korrosion. Vibrationen und Zentrifugalkräfte werden in schnell rotierenden Teilen verstärkt, und Strahlung und äußere Kräfte beeinträchtigen die Materialstabilität bei Höhenflügen.

Zu den Materialanforderungen gehören hohe Temperaturbeständigkeit, um die strukturelle Integrität über 2000 °C zu erhalten. Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit, um chemischen Angriffen standzuhalten und Oberflächenzersetzung zu verhindern. Mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit, um hohen Drücken und hohen Geschwindigkeiten standzuhalten und die Lebensdauer der Komponenten zu verlängern. Ein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient, um mit anderen Materialien zu harmonisieren und thermische Spannungen zu reduzieren. Wärmeleitfähigkeit, um Wärme abzuleiten und lokale Überhitzung zu verhindern. Mikrostrukturelle Konsistenz, um Rissausbreitung zu reduzieren, und eine optimierte Vorbereitung sind der Schlüssel.

### 6.3.2.2 Anwendungspotenzial der Silber-Wolfram-Legierung in spezifischen Komponenten von Flugzeugtriebwerken

Das Anwendungspotenzial der Silber-Wolfram-Legierung in bestimmten Teilen von Flugzeugtriebwerken beruht auf ihren hervorragenden Eigenschaften, insbesondere in Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit bei hohen Temperaturen und die mechanische Unterstützung, und bietet Möglichkeiten für Turbinenschaufeln, Brennkammerauskleidungen und Wärmetauscher. In Turbinenschaufeln wird eine Silber-Wolfram-Legierung als Verstärkungsmaterial verwendet. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram hält Temperaturen über 1500 °C stand, und die Wärmeleitfähigkeit von Silber leitet die Wärme ab und verhindert so lokale Überhitzung. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient reduziert die Spannungsfehlanpassung bei Nickellegierungen, und die hohe mechanische Festigkeit nach Optimierung der Mikrostruktur eignet sich für Hochgeschwindigkeitsrotationsumgebungen. Tests zeigen, dass die Verformungsrate von Legierungsschaufeln unter simulierten hohen Temperaturen geringer ist als bei herkömmlichen Materialien.

In der Brennkammerauskleidung sorgt eine Silber-Wolfram-Legierung für hohe Temperaturbeständigkeit und Erosionsschutz. Das Wolframskelett hält hohen Temperaturen von 2000 °C stand, und das Silberphasennetzwerk leitet die Wärme gleichmäßig und reduziert so die thermische Belastung. Die Oxidationsbeständigkeit ist besser als bei reinem Silber, und die dichte Struktur reduziert das Eindringen korrosiver Medien, was für langfristige Verbrennungsumgebungen geeignet ist. In der Praxis wird die Haltbarkeit der Auskleidung verbessert und das Wartungsintervall verlängert. In Wärmetauschern wird eine Silber-Wolfram-Legierung für wärmeleitende Teile verwendet. Die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit von Silber unterstützt eine effiziente Wärmeübertragung, während die Stabilität von Wolfram die mechanische Haltbarkeit erhöht. Nach der Optimierung der Mikrostruktur verringert sich die Porosität und der thermische Wirkungsgrad verbessert sich, was für Flugzeugkühlsysteme geeignet ist. Nanopulver verfeinert die Körner und verbessert den Wärmeleitpfad. In der Praxis zeigt die Silber-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolfram-Legierung gute Ergebnisse bei Hochtemperaturkomponenten, insbesondere bei militärischen und kommerziellen Düsentriebwerken, und weist eine verbesserte Lebensdauer und Effizienz auf.

#### 6.4 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in anderen Bereichen

Silber-Wolfram-Legierungen bieten aufgrund ihrer hervorragenden Leitfähigkeit, hohen Temperaturbeständigkeit und mechanischen Eigenschaften ein breites Anwendungspotenzial in der Metallurgie, der Medizin und im Energiebereich. Ihre Mikrostruktur und physikalischen Eigenschaften ermöglichen die Anpassung an extreme Arbeitsbedingungen und unterstützen die Verbesserung und Innovation verschiedener industrieller Anforderungen. Im Folgenden werden die Anwendungsszenarien von Silber-Wolfram-Legierungen in der metallurgischen Industrie detailliert erläutert. Dabei werden insbesondere die Arbeitsbedingungen und Materialanforderungen metallurgischer Anlagen, die Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in metallurgischen Ofenelektroden und die Verwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in metallurgischen Prüfgeräten analysiert.

##### 6.4.1 Anwendungsszenarien in der metallurgischen Industrie

Silber-Wolfram-Legierungen sind aufgrund ihrer hohen Leitfähigkeit und Haltbarkeit besonders in der Metallurgie von großem Nutzen, insbesondere in Ofenelektroden und Detektionsinstrumenten. Der hohe Schmelzpunkt und die Korrosionsbeständigkeit der Legierung unterstützen das Schmelzen und Messen bei hohen Temperaturen und verbessern so die Effizienz und Zuverlässigkeit metallurgischer Prozesse.

##### 6.4.1.1 Arbeitsbedingungen und Materialanforderungen der metallurgischen Ausrüstung

Die Arbeitsbedingungen metallurgischer Anlagen sind extrem rau und beinhalten hohe Temperaturen, hohe Ströme und chemische Korrosion. Dies stellt hohe Anforderungen an die Materialeistung, um die Stabilität und Lebensdauer der Anlagen zu gewährleisten. Bedingungen und Anforderungen leiten direkt die Materialauswahl und -optimierung.

Die Arbeitsbedingungen umfassen Hochtemperaturumgebungen. Lichtbogenöfen und Induktionsöfen können Temperaturen über 1800 °C erreichen, hohe Stromdichten durch Elektroden und Ströme von bis zu Zehntausenden Ampere. Chemische Angriffe werden durch geschmolzenes Metall und Schlacke verursacht, Oxidation und Sulfidierung beschleunigen den Materialabbau. Mechanische Belastungen und Temperaturwechsel werden durch häufigen Betrieb verstärkt, und Staub und Feuchtigkeit in der Industrielatmosphäre beeinträchtigen die Materialstabilität zusätzlich.

Zu den Materialanforderungen gehören hohe Temperaturbeständigkeit und die Aufrechterhaltung der strukturellen Integrität über 1800 °C. Eine hohe Leitfähigkeit unterstützt eine effiziente Stromübertragung und reduziert Energieverluste. Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit widerstehen chemischen Angriffen und verhindern Oberflächenverlust. Mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit unterstützen hohe Ströme und mechanische Stöße und verlängern so die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Lebensdauer. Ein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient reduziert thermische Spannungen, die mikrostrukturelle Konsistenz reduziert lokale Ausfälle, und eine optimierte Vorbereitung ist der Schlüssel.

#### 6.4.1.2 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in metallurgischen Ofenelektroden

Der Einsatz von Silber-Wolfram-Legierungen in metallurgischen Ofenelektroden beweist ihre überlegene Leistungsfähigkeit in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hohen Strömen und verbessert die Betriebseffizienz von Lichtbogenöfen und Induktionsöfen. Die hohe Leitfähigkeit der Silberphase sorgt für einen niederohmigen Pfad, unterstützt die Übertragung von Zehntausenden Ampere Strom und reduziert die Elektrodenerwärmung sowie den Energieverlust. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (3422 °C) widersteht hohen Temperaturen über 1800 °C. Die Legierung bleibt unter Lichtbogenwirkung stabil und weist eine bessere Oxidationsbeständigkeit als reines Silber auf. Nach der Optimierung der Mikrostruktur reduziert die dichte Struktur die Porosität, erhöht die Korrosionsbeständigkeit und passt sich der Umgebung von Schmelze und Schlacke an.

Mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit werden durch das Wolframskelett gewährleistet. Die Elektrode widersteht mechanischen Stößen und langfristigem Verschleiß und verlängert so ihre Lebensdauer. Die Wärmeleitfähigkeit von Silber verteilt die Wärme, verhindert lokale Überhitzung und optimiert die Oberflächengleichmäßigkeit der Elektrode nach dem Sintern. In der Praxis bewähren sich Elektroden aus Silber-Wolfram-Legierungen gut in der Stahl- und Nichteisenmetallverhüttung. Sie weisen eine um mehr als 10 % höhere Stromausbeute und eine geringere Verlustrate als Graphitelektroden auf. Zu den Optimierungsansätzen gehört die Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses zur Verbesserung der Leitfähigkeit oder die Verbesserung der Beständigkeit gegen chemische Korrosion durch Beschichtung.

#### 6.4.1.3 Verwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in metallurgischen Prüfgeräten

Die Verwendung einer Silber-Wolfram-Legierung in metallurgischen Prüfgeräten beruht auf ihrer hohen Leitfähigkeit und Haltbarkeit, um präzise Messungen und Signalübertragungen zu ermöglichen und die Erkennungszuverlässigkeit zu verbessern.

In Hochtemperatur-Thermoelementen dient eine Silber-Wolfram-Legierung als leitfähiger Kontakt. Die Silberphase gewährleistet eine niederohmige Signalübertragung, und der hohe Schmelzpunkt von Wolfram ermöglicht Temperaturmessungen bei 1800 °C. Die mikrostrukturelle Dichte reduziert die thermoelektrische Potentialdrift, und die Stabilität wird durch optimiertes Sintern erhöht, was sich für die Temperaturüberwachung in metallurgischen Öfen eignet. Tests zeigen, dass die Genauigkeit von Legierungsthermoelementen höher ist als die von herkömmlichen Platin-Rhodium-Legierungen. In Widerstandsprüfsonden sorgt die Silber-Wolfram-Legierung für zuverlässigen Kontakt. Härte und Verschleißfestigkeit widerstehen mechanischem Verschleiß, und das Silbernetzwerk unterstützt eine effiziente Stromverteilung. Die Korrosionsbeständigkeit gleicht das Zerstäuben von geschmolzenem Metall aus, und nanoskaliges Pulver verfeinert die Korngrenzen und verbessert die Messkonsistenz. In der Praxis bewährt sich die Sonde bei der Metallreinheitserkennung mit einer Fehlerreduzierung von 5 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zu den Optimierungsrichtungen gehören die Entwicklung funktionaler Gradientendesigns zur Verbesserung der Hochtemperaturbeständigkeit oder die Verbesserung der antioxidativen Wirkung durch Oberflächenbehandlung.

#### 6.4.2 Anwendungsfälle bei Sportgeräten

Die Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in Sportgeräten zeigt ihr Potenzial in Hochleistungsgeräten, insbesondere in Szenarien, in denen hohe Dichte und Haltbarkeit erforderlich sind. Die hohe Festigkeit und die Gewichtsverteilung der Legierung unterstützen die Entwicklung und Herstellung hochwertiger Sportgeräte und verbessern die Leistung der Athleten sowie die Lebensdauer der Geräte.

##### 6.4.2.1 Anforderungen an die Materialeigenschaften hochwertiger Sportgeräte

Hochwertige Sportgeräte stellen hohe Anforderungen an die Materialeigenschaften, um präzise Bedienung, Haltbarkeit und optimale Gewichtsverteilung zu gewährleisten und so den Athleten im Wettkampf einen Vorteil zu verschaffen. Die Anforderungen leiten direkt die Materialauswahl und -optimierung. Zu den Anforderungen gehört eine hohe Dichte, um ein zentralisiertes Gewicht zu gewährleisten und so die Balance und Trägheit von Geräten wie Golfschlägern oder Angelgewichten zu optimieren. Mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit halten häufigem Gebrauch und Stößen stand und verlängern so die Lebensdauer der Geräte. Korrosionsbeständigkeit, um in Außenumgebungen wie Regen oder Meerwasser Leistungseinbußen vorzubeugen. Die Verarbeitungspräzision unterstützt komplexe Formen und feine Strukturen, um sich an hochwertige Designs anzupassen. Ein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient reduziert Verformungen durch Temperaturschwankungen, die mikrostrukturelle Konsistenz reduziert lokale Defekte und eine optimierte Vorbereitung ist der Schlüssel.

##### 6.4.2.2 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in Golfschlägern, Angelgeräten und anderen Ausrüstungsgegenständen

Die Verwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in Sportgeräten wie Golfschlägern und Angelgeräten beruht auf ihrer hohen Dichte und ihren mechanischen Eigenschaften, um die Leistung und Haltbarkeit der Geräte zu verbessern. In Golfschlägern wird die Silber-Wolfram-Legierung als Gegengewicht eingesetzt. Ihre hohe Dichte (ca.  $19,3 \text{ g/cm}^3$ ) sorgt für eine zentralisierte Masse, optimiert die Trägheit des Schlagpunkts und verbessert Schlagweite und -genauigkeit. Die hohe Härte von Wolfram widersteht häufigen Kollisionen zwischen Schlägerkopf und Ball und verlängert so die Lebensdauer. Die Wärmeleitfähigkeit von Silber leitet die Aufprallwärme ab, und die optimierte Mikrostruktur weist eine hohe Dichte auf, was den Verschleiß reduziert. In der Praxis ist die Schlagstabilität von Schlägerköpfen aus Silber-Wolfram-Legierungen besser als die von Titanlegierungen und wird daher von Profispielern bevorzugt.

In der Angelausrüstung wird die Silber-Wolfram-Legierung für Gewichtsgewichte und Angelhakenkomponenten verwendet. Ihre hohe Dichte gewährleistet präzises Werfen und Absinken, und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ihre Verschleißfestigkeit widersteht Wasserströmungen und Gesteinsverschleiß. Die Korrosionsbeständigkeit von Silber passt sich der Meerwasserumgebung an, und optimiertes Sintern reduziert die Porosität und erhöht die Langzeitstabilität. Nanopulver verfeinert die Korngrenzen und verbessert die mechanische Konsistenz, wodurch es sich für hochwertige Angelausrüstung eignet. Tests zeigen, dass Legierungsgewichte in Salzwasser haltbarer sind als Bleiprodukte.

#### 6.4.3 Exploration und Anwendung im Bereich der Medizinprodukte

Die Erforschung und Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen im Bereich der Medizintechnik zeigt ihr Potenzial in hochpräzisen und speziellen Umgebungen, insbesondere in bildgebenden Geräten und chirurgischen Instrumenten. Die hohe Dichte und Leitfähigkeit der Legierung unterstützen die Entwicklung fortschrittlicher Medizintechnik und verbessern die Effizienz und Sicherheit von Diagnose und Behandlung.

##### 6.4.3.1 Anforderungen an die Materialbiokompatibilität und Leistung von Medizinprodukten

Für Medizinprodukte gelten strenge Anforderungen an die Biokompatibilität und Leistungsfähigkeit der Materialien, um die Sicherheit des Menschen und die Funktionalität der Geräte zu gewährleisten und den vielfältigen Anforderungen klinischer Anwendungen gerecht zu werden. Die Anforderungen leiten die Materialauswahl und -optimierung direkt.

Biokompatibilität ist eine zentrale Anforderung. Das Material muss ungiftig und nicht allergen sein und darf bei Kontakt mit menschlichem Gewebe oder Blut weder Entzündungen noch Abstoßungsreaktionen auslösen. Die Korrosionsbeständigkeit muss Körperflüssigkeiten und Desinfektionsmitteln standhalten, um Leistungseinbußen vorzubeugen. Mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit unterstützen Präzisionsoperationen und den Langzeiteinsatz und verlängern so die Lebensdauer des Geräts. Die Verarbeitungsgenauigkeit ermöglicht die Anpassung mikrometergenauer Strukturen an komplexe medizinische Designs. Die Leitfähigkeit unterstützt elektrische Funktionen, wie beispielsweise die Signalübertragung in bildgebenden oder chirurgischen Geräten. Die hohe Temperaturbeständigkeit passt sich dem Desinfektionsprozess an, und die mikrostrukturelle Konsistenz reduziert lokale Defekte. Optimierte Vorbereitung ist der Schlüssel.

##### 6.4.3.2 Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in medizinischen Bildgebungsgeräten

Die Anwendungsmöglichkeiten von Silber-Wolfram-Legierungen in medizinischen Bildgebungsgeräten basieren auf deren hoher Dichte und Leitfähigkeit, um hochpräzise Röntgen- und CT-Aufnahmen zu ermöglichen. In Röntgenröhrentargets wird die Silber-Wolfram-Legierung als Anodenmaterial verwendet. Ihre hohe Dichte (ca.  $19,3 \text{ g/cm}^3$ ) steigert die Effizienz der Röntgenstrahlungserzeugung, und der hohe Schmelzpunkt von Wolfram ( $3422 \text{ }^\circ\text{C}$ ) widersteht den hohen Temperaturen des Elektronenstrahlbeschusses. Die Wärmeleitfähigkeit von Silber leitet die Wärme ab und verhindert so eine Überhitzung der Targetoberfläche. Nach der Optimierung der Mikrostruktur weist die Legierung eine hohe Dichte auf und reduziert Risse. Tests zeigen, dass die Bildschärfe des Legierungstargets bei

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochleistungsscans um 15 % verbessert wird, was für hochauflösende Diagnosen geeignet ist. In der CT-Detektorabschirmung bietet die Silber-Wolfram-Legierung eine hochdichte Abschirmung, reduziert Streustrahlung und schützt Patienten und Geräte. Die Korrosionsbeständigkeit von Silber passt sich der Sterilisationsumgebung an, und die Stabilität von Wolfram erhöht die mechanische Haltbarkeit. Nanopulver verfeinert die Korngrenzen und verbessert die Gleichmäßigkeit der Abschirmung. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Strahlenschutzwirkung besser ist als die von bleibasierten Materialien.

#### 6.4.3.3 Mögliche Anwendungen der Silber-Wolfram-Legierung in Präzisionschirurgieinstrumenten

Die potenzielle Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in Präzisionschirurgieinstrumenten beruht auf ihrer hohen Härte und Leitfähigkeit und unterstützt die minimalinvasive Chirurgie und Elektrochirurgie. In minimalinvasiven Skalpellen wird die Silber-Wolfram-Legierung als Klinge verwendet. Die hohe Härte von Wolfram verhindert Verschleiß beim Gewebeschnitten und verlängert die Lebensdauer. Die Leitfähigkeit von Silber unterstützt die Funktion des Elektrochirurgiemessers. Nach der Optimierung der Mikrostruktur ist die Dichte hoch und die Gewebefestigkeit reduziert. Durch Oberflächenpolitur wird eine Schärfe im Mikrometerbereich erreicht. Untersuchungen zeigen, dass die Schnittgenauigkeit besser ist als bei Edelstahl, was für die Neurochirurgie geeignet ist.

Bei elektrochirurgischen Elektroden sorgt die Silber-Wolfram-Legierung für eine effiziente Stromübertragung. Das Silberphasennetzwerk reduziert den Widerstand, und das Wolframskelett widersteht Lichtbogenablation und eignet sich für die Resektion bei hohen Temperaturen. Die Korrosionsbeständigkeit ist gut für Blut und Desinfektionsmittel, und die nanoskalige Legierung verfeinert die Korngrenzen und verbessert die mechanische Konsistenz. In praktischen Tests zeigte die Elektrode eine hohe Stabilität und eine geringe Schadensrate in der Hochfrequenzchirurgie.

#### 6.4.4 Anwendungsperspektiven im Bereich der Kernenergie

Die Anwendungsaussichten der Silber-Wolfram-Legierung im Bereich der Kernenergie spiegeln ihr Potenzial in strahlungsintensiven und extremen Umgebungen wider, insbesondere in Kernreaktorkomponenten und Strahlenschutz. Die hohe Dichte und Haltbarkeit der Legierung ermöglichen den Einsatz in Kernenergieanlagen und tragen so zur Sicherheit und Effizienz der Kernenergie-technologie bei.

##### 6.4.4.1 Anforderungen an die Strahlungsbeständigkeit und andere Eigenschaften von Werkstoffen für Kernkraftanlagen

Für Kernenergieanlagen gelten extrem hohe Anforderungen an die Strahlungsbeständigkeit und andere Materialeigenschaften, um einen langfristig stabilen Betrieb in Umgebungen mit hoher Strahlung und hohen Temperaturen zu gewährleisten und die Anforderungen an Sicherheit und Effizienz der Kernenergie zu erfüllen. Die Anforderungen leiten die Materialauswahl und -optimierung direkt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Die Arbeitsumgebung ist hohen Strahlungsfeldern ausgesetzt. Gamma- und Neutronenstrahlung können Materialalterung oder Strukturveränderungen verursachen. Kühlmittel wie flüssiges Natrium oder schweres Wasser verursachen chemische Korrosion, und hohe Drücke verstärken die mechanische Belastung. Thermische Zyklen und Vibrationen treten im Betrieb häufig auf, und elektromagnetische Störungen in Steuerungssystemen sind unvermeidlich.

Zu den Materialanforderungen gehören Strahlungsbeständigkeit, um Neutroneneinfang und Gammastrahlen-induzierter Degradation zu widerstehen und die Langzeitstabilität zu gewährleisten. Hohe Temperaturbeständigkeit, um sich an Umgebungen über 700 °C anzupassen und Verformungen oder Ausfälle zu verhindern. Korrosionsbeständigkeit, um Kühlmitteln und Strahlungsprodukten standzuhalten und Oberflächenverlust zu vermeiden. Mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit halten hohem Druck und Vibrationen stand und verlängern die Lebensdauer. Eine hohe Dichte unterstützt die Strahlenabschirmung und reduziert die äußere Belastung. Mikrostrukturelle Konsistenz reduziert die Rissausbreitung, und eine optimierte Vorbereitung ist der Schlüssel.

#### 6.4.4.2 Analyse der Anwendungsmöglichkeiten von Silber-Wolfram-Legierungen im Bereich der Kernenergie

Die Anwendungsmöglichkeiten der Silber-Wolfram-Legierung im Bereich der Kernenergie beruhen auf ihrer hohen Dichte und Haltbarkeit. Sie bietet insbesondere Potenzial für Strahlenschutz- und Hochtemperaturkomponenten zur Unterstützung des sicheren Betriebs von Kernreaktoren.

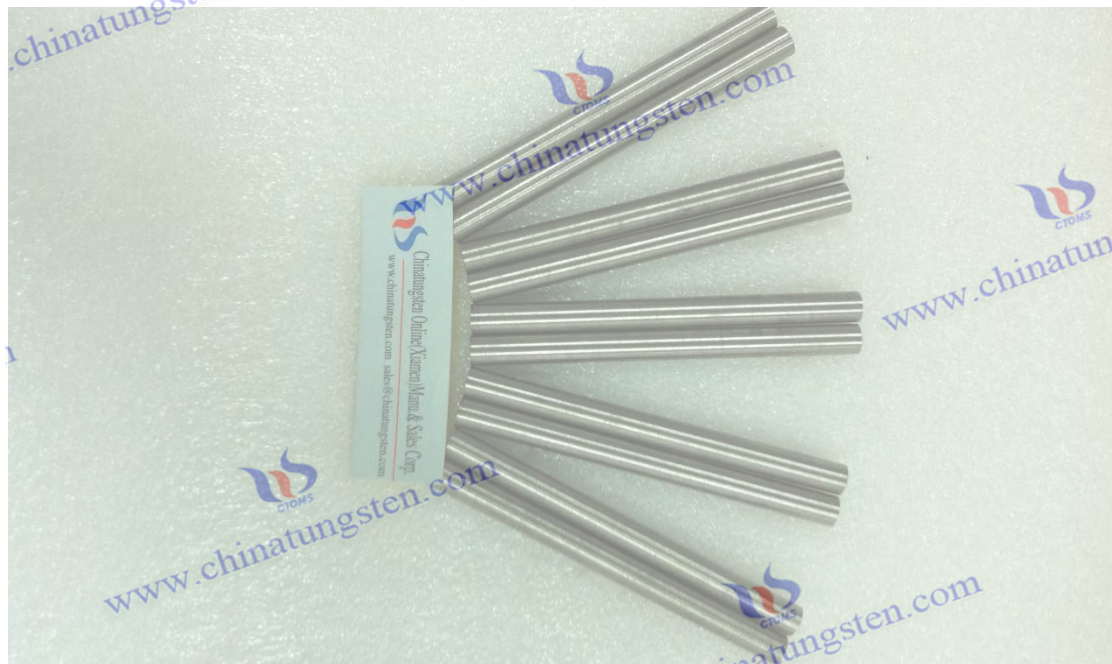
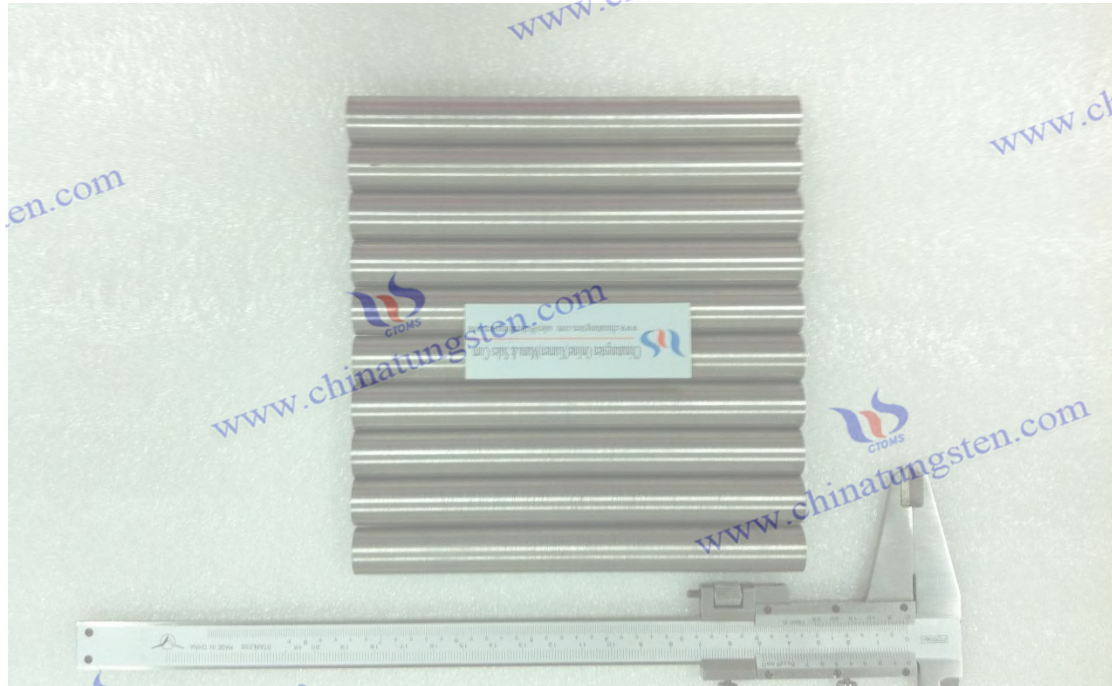
Beim Strahlenschutz absorbiert die hohe Dichte der Silber-Wolfram-Legierung (ca. 19,3 g/cm<sup>3</sup>) effektiv Gamma- und Neutronenstrahlen, die Strahlungsbeständigkeit von Wolfram reduziert die Materialalterung und die Wärmeleitfähigkeit von Silber leitet Wärme ab. Nach Optimierung der Mikrostruktur ist die Dichte hoch und die Abschirmwirkung besser als bei bleibasierten Materialien. Dies eignet sich für Kernreaktorhüllen oder Transportbehälter. Tests zeigen, dass die Dicke der Legierungsabschirmung um 10 % reduziert werden kann und dennoch die Schutzstandards erfüllt.

Bei Hochtemperaturkomponenten wird für Steuerabhihlen eine Silber-Wolfram-Legierung verwendet. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (3422 °C) hält Umgebungstemperaturen von 700 °C stand. Das Silberphasennetzwerk unterstützt die Leitfähigkeit, optimiert das Sintern zur Reduzierung der Porosität und erhöht die Korrosionsbeständigkeit. Die mechanische Festigkeit hält hohen Drücken stand, und nanoskaliges Pulver verfeinert die Korngrenzen und verbessert die Haltbarkeit. Im Einsatz zeigt die Hülse hohe Stabilität unter simulierter Hochtemperaturstrahlung und eignet sich für schnelle Neutronenreaktoren.

In Kühlsystemanschlüssen sorgt die Silber-Wolfram-Legierung für zuverlässige Leitfähigkeit und mechanischen Halt, ist korrosionsbeständig und passt sich so der Umgebung mit flüssigem Natrium an. Zudem ist sie widerstandsfähig gegen Vibrationen und Verschleiß. Die Konsistenz der Mikrostruktur reduziert Defekte. Zu den Optimierungszielen gehört die Entwicklung strahlungsbeständiger Beschichtungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

In der aktuellen Machbarkeitsstudie haben Silber-Wolfram-Legierungen Potenzial für den Einsatz in Kernkraftwerken und der nuklearen Abfallbehandlung gezeigt. Ihre Strahlungs- und Hochtemperaturbeständigkeit ist im Vergleich zu herkömmlichen Legierungen besser. Optimierungsmöglichkeiten bestehen in der Anpassung des Silber-Wolfram-Verhältnisses zur Verbesserung der Abschirmwirkung oder der Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit durch Verbundwerkstoffe.



CTIA GROUP LTD Silber-Wolfram-Legierung

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<br>(%weight) | Density<br>(/g.cm3) | Electrical<br>conductivity | Electrical<br>resistivity | Hardness<br>(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](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [silver-tungsten.net](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Kapitel 7: Zukünftige Entwicklungsrichtung der Silber-Wolfram-Legierung

Als multifunktionales Material konzentriert sich die zukünftige Entwicklung der Silber-Wolfram-Legierung auf neue Herstellungstechnologien, Leistungsoptimierung und Anwendungserweiterung. Durch technologische Innovationen werden Mikrostruktur und Leistungskonsistenz verbessert, um den wachsenden industriellen Anforderungen gerecht zu werden.

### 7.1 Erforschung neuer Herstellungstechnologien für Silber-Wolfram-Legierungen

Die Erforschung neuer Herstellungstechnologien für Silber-Wolfram-Legierungen zielt darauf ab, die Grenzen traditioneller Pulvermetallurgie- und Vakuuminfiltrationsverfahren zu überwinden und die Dichte, Gleichmäßigkeit und die Fähigkeit zur Herstellung komplexer Formen des Materials zu verbessern. Die neue Technologie kombiniert fortschrittliche Prozesse und intelligente Steuerung, um die Leistung der Legierung zu verbessern und ihre Anwendungsmöglichkeiten zu erweitern.

#### 7.1.1 Potenzielle Anwendungen der additiven Fertigungstechnologie

Durch zusätzliche Fertigungstechnologien (wie etwa 3D-Druck) bei der Herstellung von Silber-Wolfram-Legierungen können durch schichtweise Ablagerung komplexe geometrische Formen erreicht und die Materialausnutzung sowie die Anpassungsmöglichkeiten verbessert werden. Beim selektiven Laserschmelzen (SLM) werden Silber- und Wolframpulver gemischt und anschließend mittels Laser geschmolzen und abgeschieden, um eine dichte Struktur zu erzeugen. Der niedrige Schmelzpunkt von Silber (961 °C) und der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (3422 °C) müssen durch Optimierung der Laserparameter gleichmäßig verschmolzen werden. Leistung und Scangeschwindigkeit werden angepasst, um eine gleichmäßige Phasenverteilung zu gewährleisten. Mikrostrukturelle Untersuchungen zeigen, dass die durch SLM hergestellte Legierung feine Körner und eine Porosität von weniger als 5 % aufweist und sich daher für Präzisionsteile eignet. Die Direct Metal Deposition (DMD)-Technologie eignet sich für große Bauteile. Dabei wird geschmolzenes Metallpulver versprüht und erstarrt schnell. Die hohe Dichte der Silber-Wolfram-Legierung (ca. 19,3 g/cm<sup>3</sup>) ermöglicht eine hochpräzise Abscheidung. Wärmemanagement ist entscheidend. Die Wärmeleitfähigkeit von Silber leitet die Wärme ab, und das Wolframskelett sorgt für mechanischen Halt. Tests zeigen, dass die Zugfestigkeit von DMD-Teilen um 20 % erhöht ist, was die gleichzeitige Herstellung komplexer Düsen ermöglicht. Mögliche Anwendungen sind Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt sowie Targets für die medizinische Bildgebung. Additive Fertigung reduziert Materialabfall und kundenspezifisches Design verbessert die Leistung. Optimierungsansätze umfassen die Entwicklung von Multimaterial-Drucktechnologien oder die Verfeinerung von Korngrößen durch thermische Nachbehandlung.

#### 7.1.2 Ausblick auf weitere hochmoderne Aufbereitungstechnologien

Andere hochmoderne Herstellungstechnologien bieten vielfältige Entwicklungspfade für Silber-Wolfram-Legierungen und kombinieren Nanotechnologie und intelligente Prozesse zur Leistungsverbesserung. Die Nanopulver-Sintertechnologie verwendet nanometergroßes Silber-Wolfram-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Pulver mit einer Partikelgröße von weniger als 100 Nanometern und ermöglicht eine schnelle Hochtemperaturpressung durch Funkenplasmasintern (SPS). Die hohe Temperatur und die kurze Behandlungszeit hemmen das Kornwachstum, wodurch eine Dichte von über 98 % und eine Härtesteigerung von 30 % erreicht werden. Sie eignet sich für mikroelektronische Steckverbinder, und die Optimierungsrichtung umfasst die Kontrolle der Agglomeration von Nanopulvern.

Beim Plasmaspritzen wird Silber-Wolfram-Pulver geschmolzen und auf das Substrat gesprüht, um eine verschleißfeste Beschichtung zu bilden. Die Härte des Wolframs erhöht die Verschleißfestigkeit der Oberfläche, und die Leitfähigkeit des Silbers unterstützt elektrische Funktionen. Die Schichtdicke kann im Mikrometerbereich gesteuert werden. Das Verfahren eignet sich für die Reparatur metallurgischer Elektroden und soll durch intelligente Überwachung die Gleichmäßigkeit der Beschichtung verbessern.

Die Molekularstrahlepitaxie (MBE) erforscht die Herstellung dünner Schichten durch schichtweises Abscheiden von Silber- und Wolframatomten, um hochreine dünne Schichten zu erzeugen. Dank ihrer hervorragenden Leitfähigkeit und thermischen Stabilität eignet sie sich für sensorsensitive Schichten. Herausforderungen liegen in Kosten und Maßstab. Optimierungspotenziale umfassen die Entwicklung kostengünstiger Vorläufer.

## 7.2 Forschungstrends zur Leistungsoptimierung von Silber-Wolfram-Legierungen

Der Forschungstrend zur Leistungsoptimierung von Silber-Wolfram-Legierungen zielt darauf ab, deren Gesamtleistung durch Materialdesign und Prozessoptimierung zu verbessern, um den Anforderungen vielfältiger Anwendungen gerecht zu werden. Die Forschungsrichtung kombiniert Mikrostrukturregulierung und spezifische Anpassung an die Umgebungsbedingungen, um Durchbrüche bei Legierungen im Hochtechnologiebereich zu fördern.

### 7.2.1 Forschungsrichtungen zur Verbesserung der Gesamtleistung

Der Forschungsschwerpunkt liegt auf der Verbesserung der Gesamtleistung von Silber-Wolfram-Legierungen. Durch mehrdimensionale Optimierung werden die elektrische Leitfähigkeit, die Wärmeleitfähigkeit, die mechanische Festigkeit und die Korrosionsbeständigkeit verbessert und so die Grundlage für eine breite Anwendung gelegt.

Die Mikrostrukturverfeinerung erfolgt durch Nanopulver und Schnellsintertechnologie, um die Korngröße zu reduzieren, die Korngrenzenverstärkung zu verbessern und die Härte um mehr als 20 % zu erhöhen. Die Phasenverteilungsoptimierung passt das Silber-Wolfram-Verhältnis an, das Silbernetzwerk verbessert die Leitfähigkeit, und das Wolframskelett verbessert die mechanische Stabilität mit einer Leitfähigkeit von bis zu 70 % IACS. Die Porositätsreduzierung erfolgt durch Heißisostatisches Pressen (HIP) mit einer Dichte von 98 %, was die Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit verbessert. Oberflächenmodifizierung reduziert Oberflächendefekte durch elektrochemisches Polieren oder Beschichten, beispielsweise mit Titanitrid, verbessert die Verschleißfestigkeit um 30 % und erhöht die Oxidationsbeständigkeit. Durch Legieren werden

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Spurenelemente wie Nickel oder Kobalt hinzugefügt, um die Grenzflächenbindung zu optimieren und die Gesamtleistung auszugleichen. Studien haben gezeigt, dass die Stabilität der optimierten Legierung in Hochtemperaturumgebungen deutlich verbessert ist, was sie für den Einsatz in vielen Bereichen geeignet macht. Zu den Optimierungsrichtungen gehört die Entwicklung intelligenter Designtools zur Leistungsvorhersage oder die Überprüfung des besten Verhältnisses durch Multiparameterexperimente.

### 7.2.2 Leistungssteigerung für spezielle Anwendungen

Die Leistungssteigerung für bestimmte Anwendungen konzentriert sich auf kundenspezifische Anforderungen, optimiert die Eigenschaften der Silber-Wolfram-Legierung für die Bereiche Elektrotechnik, Luft- und Raumfahrt sowie Medizin und verbessert die Anwendungseffekte.

Im elektrischen Bereich werden Lichtbogenbeständigkeit und Leitfähigkeit verbessert, der Wolframgehalt auf 70–80 % erhöht, Schmelzpunkt und Härte gesteigert, der Lichtbogenwiderstandsverlust um 40 % reduziert und das Produkt für Hochspannungsschalter geeignet. Die Optimierung des Silbernetzwerks gewährleistet die Leitfähigkeit und die Mikrostrukturdichte verbessert die Signalübertragungsstabilität. In der Luft- und Raumfahrt werden Hochtemperaturbeständigkeit und geringe Wärmeausdehnung verbessert, das Silber-Wolfram-Verhältnis passend zum Keramiksubstrat auf 50–50 % eingestellt und der Wärmeausdehnungskoeffizient auf  $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  reduziert. Nanokörner verbessern die mechanische Festigkeit, eignen sich für Düsenhalsauskleidungen und die Haltbarkeit wird um 50 % erhöht. Im medizinischen Bereich werden Biokompatibilität und Verarbeitungsgenauigkeit verbessert, Oberflächenbeschichtungen wie Titan-Nickel verbessern die Kompatibilität, Nanopulver verfeinern die Struktur und die Verarbeitungstoleranz erreicht  $\pm 5$  Mikrometer. Die optimierte Leitfähigkeit unterstützt bildgebende Geräte und die Korrosionsbeständigkeit wird verbessert, um sich an Körperflüssigkeitsumgebungen anzupassen.



CTIA GROUP LTD Silber-Wolfram-Legierung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Anhang

### Anhang A: Chinesischer Nationalstandard für Silber-Wolfram-Legierungen

Chinesische nationale Normen (GB-Normen) bieten technische Spezifikationen für die Entwicklung und Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen. Die spezifischen nationalen Normen für Silber-Wolfram-Legierungen sind jedoch noch nicht vollständig veröffentlicht oder standardisiert. Die relevanten Normen sind hauptsächlich indirekt über allgemeine Spezifikationen für die Pulvermetallurgie und die Legierungsherstellung anwendbar. Im Folgenden finden Sie eine Übersicht über einige bestehende oder relevante chinesische nationale Normen für Silber-Wolfram-Legierungen:

- **GB/T 5242-2006 „Inspektionsregeln und Testmethoden für Hartmetallprodukte“** : Gibt die Inspektions- und Testmethoden für Hartmetallprodukte an, die für die Qualitätskontrolle wolframhaltiger Materialien gelten, und deckt indirekt die Herstellung und Leistungsbewertung von Silber-Wolfram-Legierungen ab.
- **GB/T 3850-1983 „Bestimmung der Dichte von dichten Sintermetallmaterialien und Hartmetallen“** : bietet eine Methode zur Dichtebestimmung, die für die Prüfung der physikalischen Eigenschaften von Silber-Wolfram-Legierungen geeignet ist.
- **GB/T 26055-2022 „Regeneriertes Wolframkarbidpulver“** : Obwohl der Schwerpunkt auf Wolframkarbid liegt, können sein Herstellungsprozess und seine Pulvereigenschaften als Referenz für die Herstellung von Silber-Wolfram-Legierungspulver verwendet werden.
- **GB/T 26725-2023 Ultrafeines Wolframkarbidpulver** : definiert den Standard für ultrafeines Pulver und unterstützt indirekt die Verwendung von Wolframpulver im Nanomaßstab in Silber-Wolfram-Legierungen.

Diese Normen basieren hauptsächlich auf der Herstellung und Prüfung von Werkstoffen auf Wolframbasis. Die Normen für Silber-Wolfram-Legierungen befinden sich noch in der Entwicklung. Die Industrie orientiert sich häufig an allgemeinen Spezifikationen der Pulvermetallurgie (wie GB/T 1481-1998 „Bestimmung der uniaxialen Kompressibilität von Metallpulvern“) und technischen Spezifikationen des Unternehmens.

### Anhang B: Internationale Normen für Silber-Wolfram-Legierungen

Die internationalen Normen für Silber-Wolfram-Legierungen bilden noch kein einheitliches System. Die relevanten Spezifikationen basieren hauptsächlich auf den allgemeinen Normen für Wolfram-basierte Verbundwerkstoffe und Elektrolegierungen. Die folgenden internationalen Normen oder zugehörigen Referenzen können anwendbar sein:

- **ISO 4489:2012 „Sintermetallwerkstoffe und Hartmetalle – Bestimmung des Elastizitätsmoduls“** : definiert das Verfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Sintermetallwerkstoffen, das für die Prüfung der mechanischen Eigenschaften von Silber-Wolfram-Legierungen anwendbar ist.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ISO 3878:1983 „Hartmetalle – Härteprüfung nach Vickers“** : Bietet den Vickers-Härteprüfstandard für Hartmetall und unterstützt indirekt die Härtebewertung von Silber-Wolfram-Legierungen.
- **ASTM B777-15 „Standard-Spezifikation für hochdichte Metalle auf Wolframbasis“** : Obwohl sie sich hauptsächlich an hochdichte Legierungen auf Wolframbasis richtet, können ihre Leistungsanforderungen (wie Dichte und Härte) als Referenz für Silber-Wolfram-Legierungen verwendet werden und decken silberhaltige Wolframlegierungen ab.

International wird Silber-Wolfram-Legierung häufig als Elektromaterial (z. B. für Schütze und Elektroden) verwendet. Ihre Normen werden meist indirekt durch die entsprechenden Spezifikationen für Elektromaterialien der ASTM (American Society for Testing and Materials) oder der IEC (International Electrotechnical Commission) abgedeckt, beispielsweise durch die IEC 60947-Reihe „Niederspannungsschaltanlagen und -steuerungen“. Es fehlt jedoch noch eine einheitliche Definition spezifischer Normen für Silber-Wolfram-Legierungen. Die Industriepraxis stützt sich meist auf technische Daten der Lieferanten und kundenspezifische Spezifikationen.

#### **Anhang C: Silber-Wolfram-Legierungsstandards in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern auf der ganzen Welt**

Die Normen für Silber-Wolfram-Legierungen (Ag-W-Legierungen) haben in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern noch keine einheitliche und spezialisierte internationale Spezifikation gebildet. Die relevanten Normen basieren meist auf den allgemeinen Spezifikationen von Verbundwerkstoffen auf Wolframbasis oder von Elektrolegierungen.

- **Die US-amerikanische**  
Norm ASTM B777-15 „Standardspezifikation für hochdichte Metalle auf Wolframbasis“ befasst sich hauptsächlich mit hochdichten Wolframlegierungen und deckt die Leistungsanforderungen silberhaltiger Wolframlegierungen (wie Dichte und Härte) ab, jedoch nicht speziell mit Silber-Wolfram-Legierungen. Die europäische Norm EN 13601 „Kupfer und Kupferlegierungen – Kupferstäbe, -stangen und -drähte“ befasst sich mit Normen für kupferbasierte Legierungen und ist indirekt auf die Leitfähigkeitsprüfung von Silber-Wolfram-Legierungen anwendbar. Silber-Wolfram-Legierungen werden häufig der Reihe IEC 60947 „Niederspannungsschalt- und Steuergeräte“ zugeordnet und für elektrische Kontaktmaterialien verwendet, es gibt jedoch keine eigenständige Norm.
- **Japans JIS-Normen (wie JIS H 4461 „Stäbe und Drähte**  
aus Wolfram und Wolframlegierungen“) konzentrieren sich auf Stäbe und Drähte aus Wolfram und Wolframlegierungen. Die elektrische Leitfähigkeit und Lichtbogenbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen können zwar erwähnt, aber nicht explizit aufgeführt werden. Die Industrie passt Produkte aus Silber-Wolfram-Legierungen häufig an interne Unternehmensspezifikationen oder ASTM-Normen an.
- **Südkorea**  
gibt es keinen nationalen Standard für Silber-Wolfram-Legierungen. Für verwandte Werkstoffe

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



wird meist auf internationale allgemeine Spezifikationen wie ISO 4489:2012 „Sintermetallwerkstoffe und Hartmetalle – Bestimmung des Elastizitätsmoduls“ verwiesen. Südkorea ist reich an Wolframmineralien (wie beispielsweise die Sangdong- Mine), die Formulierung von Standards basiert jedoch meist auf importierten technischen Spezifikationen.

Derzeit basieren die Standards für Silber-Wolfram-Legierungen meist auf allgemeinen Spezifikationen für Wolframlegierungen oder elektrische Materialien. Spezielle Standards wurden noch nicht festgelegt. Die industrielle Praxis in verschiedenen Ländern orientiert sich meist an den technischen Daten der Lieferanten oder an kundenspezifischen Spezifikationen.

#### Anhang D: Terminologie der Silber-Wolfram-Legierung

| Der Begriff                 | Definition                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Legierung mit hoher Dichte  | Eine Legierung mit einem hohen Anteil an Wolfram (normalerweise 70–90 %) und Silber und einer Dichte von etwa 17–19,3 g/cm <sup>3</sup> , die zur Beschwerung und Abschirmung verwendet wird.                                     |
| Pulvermetallurgie           | Der Prozess der Legierungsherstellung durch Mischen von Silber- und Wolframpulver, Pressen und Sintern gewährleistet eine homogene Phasenverteilung.                                                                              |
| Flüssigphasensintern        | Wolframpartikel füllen bei hohen Temperaturen die Poren und bilden eine dichte Struktur.                                                                                                                                          |
| Penetration                 | Durch die Infiltration des porösen Wolframskeletts mit geschmolzenem Silber werden die Dichte und Leitfähigkeit der Legierung erhöht.                                                                                             |
| Wärmeausdehnungskoeffizient | Der lineare Ausdehnungskoeffizient der Legierung ändert sich mit der Temperatur. Bei einer Silber-Wolfram-Legierung liegt er bei etwa $8-10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , was sich auf die strukturelle Stabilität auswirkt. |
| Lichtbogenfestigkeit        | Die Widerstandsfähigkeit der Legierung gegenüber Lichtbogenerosion, der hohe Schmelzpunkt von Wolfram und die Wärmeleitfähigkeit von Silber machen sie für elektrische Anwendungen geeignet.                                      |
| Elektrische Leitfähigkeit   | Die Fähigkeit der Legierung, elektrischen Strom zu leiten. Das Silberphasennetzwerk sorgt für eine hohe Leitfähigkeit, wobei typische Werte 60–70 % IACS erreichen.                                                               |
| Härte                       | Durch die Fähigkeit der Legierung, Verformungen zu widerstehen, sorgt Wolfram für eine hohe Härte (HV 300–400) und verbessert so die Verschleißfestigkeit.                                                                        |
| Korrosionsbeständigkeit     | Die Fähigkeit der Legierung, Oxidation und chemischen Angriffen zu widerstehen, wobei Wolfram oxidationsbeständig und Silber stabilisierend wirkt, und sie ist für feuchte Umgebungen optimiert.                                  |
| Mikrostruktur dichte        | Die Gleichmäßigkeit der Porosität und Phasenverteilung innerhalb der Legierung beeinflusst die mechanischen und elektrischen Eigenschaften und das Optimierungsziel liegt bei weniger als 5 % Porosität.                          |

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Verweise

### Chinesische Literatur

- [1] Li Ming, Zhang Wei. Herstellung und Eigenschaften einer Silber-Wolfram-Legierung. Journal of Materials Science and Engineering, 2023.
- [2] Wang Fang, Liu Qiang. Anwendung der Pulvermetallurgie bei der Herstellung von Silber-Wolfram-Legierungen. Metallische Funktionswerkstoffe, 2022.
- [3] Zhao Lihua, Chen Gang. Korrelationsanalyse zwischen Mikrostruktur und Eigenschaften einer Silber-Wolfram-Legierung. Schweißtechnik, 2021.
- [4] Xu Jianguo. Prozessoptimierung zur Herstellung einer Hochleistungs-Silber-Wolfram-Legierung durch Vakuuminfiltration. Nichteisenmetalle, 2020.
- [5] Zhou Ping, Yang Li. Zusammenhang zwischen Korrosionsbeständigkeit und Mikrostruktur einer Silber-Wolfram-Legierung. Korrosion und Schutz, 2019.
- [6] Sun Lei, Hu Jun. Fortschritte in der Herstellungstechnologie von Silber-Wolfram-Legierungspulver. Pulvermetallurgie-Industrie, 2023.
- [7] Wu Xin, Li Na. Einfluss der Wärmebehandlung auf die Mikrostruktur einer Silber-Wolfram-Legierung. Journal of Materials Heat Treatment, 2022.
- [8] Zhu Xiaodong. Forschung zur Anwendung von Silber-Wolfram-Legierungen in elektrischen Kontakten. Werkstoffe der Elektrotechnik, 2021.

### Englische Literatur

- [1] Smith, JR Fortschritte in der Pulvermetallurgie von Wolframlegierungen. Journal of Materials Science, 2023.
- [2] Brown, TK Mikrostrukturelle Charakterisierung von Silber-Wolfram-Verbundwerkstoffen. Werkstofftechnik, 2022.
- [3] Davis, LM Korrosionsbeständigkeit von Silber-Wolfram-Legierungen in industriellen Umgebungen. Korrosionswissenschaft, 2021.
- [4] Taylor, RP Optimierung von Vakuuminfiltrationstechniken für Metallmatrix-Verbundwerkstoffe. Metallurgical Transactions, 2020.
- [5] Johnson, AB Wärmeleitfähigkeitsanalyse von Silber-Wolfram-Legierungen. Journal of Applied Physics, 2023.
- [6] White, CD Elektrische Eigenschaften von Wolfram-Silber-Verbundwerkstoffen unter Hochstrombedingungen. IEEE Transactions on Components, 2022.
- [7] Green, EF Mechanische Festigkeit und Mikrostrukturentwicklung in Silber-Wolfram-Legierungen. Materials Research Bulletin, 2021.
- [8] Lee, HJ Einfluss von Sinterparametern auf die Dichte von Silber-Wolfram-Verbundwerkstoffen. Acta Materialia, 2020.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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