

## Was ist eine Wolfram-Nickel-Kupfer-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 Marktrendanalysen 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 Überblick über Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

- 1.1 Definition und Klassifizierung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung
  - 1.1.1 Zusammensetzungsbereich des ternären Systems
  - 1.1.2 Dichteklassifizierung und Anwendungsbezug
- 1.2 Entwicklungsgeschichte von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung
  - 1.2.1 Ursprung und frühe Forschung
  - 1.2.2 Militäranwendungsgetriebene Periode
  - 1.2.3 Großangelegte Anwendung in der modernen Elektronikindustrie

### Kapitel 2 Mikrostruktur von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

- 2.1 Mikrostruktureigenschaften von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung
  - 2.1.1 Verteilung von Wolframpartikeln
  - 2.1.2 Verteilung der Ni-Cu-Bindephase
  - 2.1.3 Bildungsmechanismus der Sinterhalsen
- 2.2 Mikrostruktur und Grenzflächeneigenschaften von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung
  - 2.2.1 Grenzflächenbindungsfestigkeit von Wolfram-Bindephase
  - 2.2.2 Einflüsse von Spurenelementen auf die Grenzfläche
- 2.3 Mikrostrukturevolution von W-Ni-Cu-Legierung
  - 2.3.1 Korngrößenzunahmegesetz während des Sinterns
  - 2.3.2 Regulierung der Mikrostruktur durch Wärmebehandlung

### Kapitel 3 Physikalische und chemische Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

- 3.1 Mechanische Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung
  - 3.1.1 Zugfestigkeit bei Raumtemperatur
  - 3.1.2 Dehnung
  - 3.1.3 Hochtemperaturbeständigkeit
  - 3.1.4 Schlagzähigkeit
- 3.2 Thermische und elektrische Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung
  - 3.2.1 Wärmeleitfähigkeit
  - 3.2.2 Leitfähigkeit
  - 3.2.3 Thermischer Ausdehnungskoeffizient
  - 3.2.4 Wärmeabfuhrleistung
- 3.3 Chemische Stabilität von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung
  - 3.3.1 Korrosionsbeständigkeit
  - 3.3.2 Antioxidationsfähigkeit
- 3.4 MSDS der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung von CTIA GROUP LTD

### Kapitel 4 Leistungstests und Normen von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

- 4.1 Zusammensetzungsanalyseverfahren von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung
  - 4.1.1 Spektralanalyse-Technologie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 4.1.2 Detektion von Verunreinigungselementen
- 4.2 Leistungstestverfahren von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung
  - 4.2.1 Dicht- und Verdichtigkeitstest
  - 4.2.2 Zugfestigkeits- und Streckgrenzentest
  - 4.2.3 Duktilitätstest
  - 4.2.4 Zähigkeitstest
  - 4.2.5 Thermischer Leistungstest
  - 4.2.6 Elektrischer Leistungstest
  - 4.2.7 Chemischer Leistungstest
- 4.3 Normensystem von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung
  - 4.3.1 Chinesische nationale Norm für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung
  - 4.3.2 Internationale Normen für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen
  - 4.3.3 Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungsnormen in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern weltweit

## **Kapitel 5 Herstellungstechnologie von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung**

- 5.1 Vorbehandlung von Rohstoffen
  - 5.1.1 Sphäroidisierung von Wolframpulver und Partikelgrößenkontrolle
  - 5.1.2 Oberflächenbehandlung von Nickel-Kupfer-Pulver
- 5.2 Pulvermetallurgisches Verfahren
  - 5.2.1 Parameter des Pulvermischungsverfahrens
  - 5.2.2 Pressverfahren
  - 5.2.3 Flüssigphasen-Sinterverfahren
- 5.3 Fortgeschrittene Herstellungstechnologie
  - 5.3.1 Metallspritzgießen
  - 5.3.2 Heißisostatisches Pressverfahren
- 5.4 Nachbearbeitung und Verarbeitung
  - 5.4.1 Präzisionsbearbeitung
  - 5.4.2 Oberflächenbehandlungsprozess

## **Kapitel 6 Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung im Bereich der elektronischen Information**

- 6.1 Chip-Packaging und Wärmeabfuhr
  - 6.1.1 Wärmeabfuhrsubstrat für Hochleistungsbauteile
  - 6.1.2 Gegengewichtswärmenenke für 5G-RF-Module
- 6.2 Mikrowellen- und Radargeräte
  - 6.2.1 Antennengewichtsanordnung
  - 6.2.2 Radarabschirmkomponenten
- 6.3 Mikroelektromechanische Systeme
  - 6.3.1 Gegengewicht für Trägheitssensoren
  - 6.3.2 Mikroausgleichskomponenten

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

## **Kapitel 7 Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung im Bereich Energie und Industrie**

- 7.1 Bereich der Elektrofahrzeuge
  - 7.1.1 Motorrotorgewicht
  - 7.1.2 Wärmeabfuhrsubstrat für Batteriepakete
- 7.2 Industrielle Kühlungslösungen
  - 7.2.1 Serverkühlungsbasis
  - 7.2.2 Verpackungssubstrat für Leistungshalbleiter

## **Kapitel 8 Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung im Bereich der nationalen Verteidigung und Rüstung**

- 8.1 Elektronische Gegenmaßnahmen-Geräte
  - 8.1.1 Gegenmaßnahmen-Gewichtsanzordnung
  - 8.1.2 Radarlockkomponenten
- 8.2 Munitionssystem
  - 8.2.1 Projektilsprengkopfgegendruck
  - 8.2.2 Ausgleichskomponenten für Raketenköpfe
- 8.3 Panzerung und Schutzausrüstung
  - 8.3.1 Verstärkungen für leichte Panzerplatten
  - 8.3.2 Schutzauskleidungen für Panzerwagen
- 8.4 Weltraumwaffen
  - 8.4.1 Düsenkomponenten von Raketenmotoren
  - 8.4.2 Lagekontrollgegensätze für Raumfahrzeuge

## **Kapitel 9 Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung im medizinischen Bereich**

- 9.1 Radiotherapiegeräte
  - 9.1.1 Radiotherapieabschirmungsanzordnung
- 9.2 Diagnostik-Bildgebungsgeräte
  - 9.2.1 Schutzteile für CT-Detektoren
  - 9.2.2 Gegengewichte für MRT-Geräte
- 9.3 Chirurgische Instrumente
  - 9.3.1 Hochpräzise chirurgische Navigationspositionierkomponenten
  - 9.3.2 Führungskomponenten für minimal invasive Interventionseinrichtungen
- 9.4 Rehabilitationshilfsmittel
  - 9.4.1 Gewichtskomponenten für künstliche Gelenke
  - 9.4.2 Ausgleichseinstellungsteile für Rehabilitationsgeräte

## **Kapitel 10 Vergleich zwischen Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung und anderen Materialien**

- 10.1 Analyse von Konkurrenzmaterialien zu Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung
  - 10.1.1 Vergleich mit Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung
  - 10.1.2 Vergleich mit Kupfer-Wolfram-Legierung
- 10.2 Forschung und Entwicklung von Spitzentechnologien für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung
  - 10.2.1 Nanostrukturierte Legierungen

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.2.2 Funktional gradierte Materialien

10.3 Grüne Fertigungstechnologie für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

10.3.1 Umweltfreundlicher Herstellungsprozess

10.3.2 Abfallrecyclingtechnologie

## Kapitel 11 Häufige Probleme und Lösungen von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

11.1 Herstellungsprozess von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

11.1.1 Lösungen für Sinterdefekte

11.1.2 Kontrolle der Zusammensetzungsgleichmäßigkeit

11.2 Analyse von Anwendungsausfällen von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

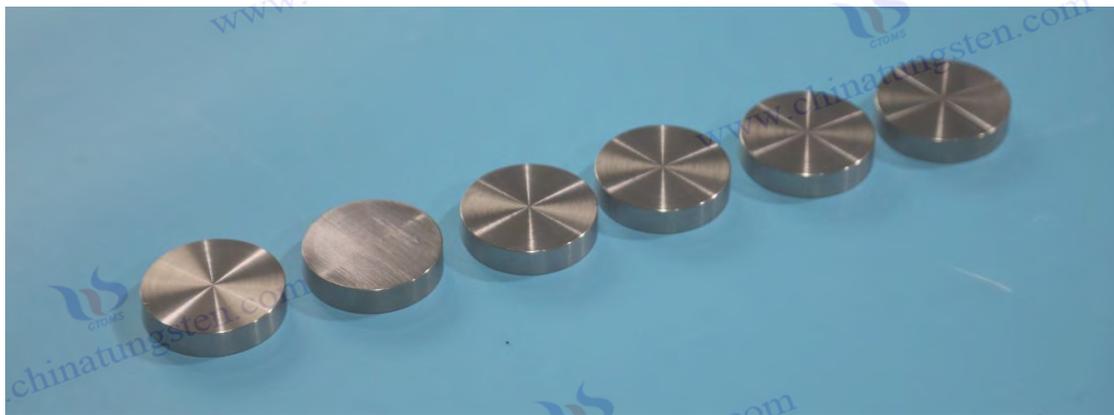
11.2.1 Lösungen für Wärmezyklusaufälle

11.2.2 Schutz vor Umgebungs Korrosion

### Anhang:

Terminologie zu Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

Literaturverzeichnis



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Kupfer-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)

## Kapitel 1 Übersicht über Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen

Wolfram-Nickel-Kupfer - Legierung ist eine hochdichte Legierung mit Wolfram als Hauptbestandteil und Nickel und Kupfer als Bindephase. Aufgrund ihrer hohen Dichte ( $16,5\text{--}18,5\text{ g/cm}^3$ ), ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit  $700\text{--}900\text{ MPa}$ , Dehnung  $5\text{--}15\%$ ), ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften und ihrer guten Korrosionsbeständigkeit findet sie breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, der Medizin, der Präzisionsinstrumentenindustrie und der Militärindustrie. Im Vergleich zu Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen weist die Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung aufgrund des Kupferzusatzes nichtmagnetische Eigenschaften auf. Dadurch eignet sie sich gut für elektromagnetisch empfindliche Umgebungen und behält gleichzeitig ihre hohe Dichte und Bearbeitbarkeit.

### 1.1 Definition und Klassifizierung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist eine hochdichte, pulvermetallurgisch hergestellte Legierung auf Wolframbasis. Sie besteht hauptsächlich aus Wolfram (normalerweise  $85\text{--}97\%$  Masseprozent) sowie Nickel und Kupfer als Bindephasen, wodurch die Legierung eine hohe Dichte, hohe Festigkeit und gute Verarbeitungseigenschaften erhält. Ihre Haupteigenschaften sind Nichtmagnetismus, ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit ( $120\text{--}150\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) und niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient ( $4,5\text{--}6,0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ), wodurch sie sich gut für Szenarien eignet, die hochdichte Gegengewichte oder Strahlenabschirmung erfordern. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen können je nach Wolframgehalt, Nickel-Kupfer-Verhältnis und Leistungsanforderungen in verschiedene Typen unterteilt und normalerweise nach Dichte oder Anwendungsbereich klassifiziert werden. Im Folgenden werden der Zusammensetzungsbereich ihres ternären Systems und der Zusammenhang zwischen Dichteklassifizierung und Anwendung detailliert analysiert.

#### 1.1.1 Zusammensetzungsbereich ternärer Systeme

Wolfram -Nickel-Kupfer-Legierungen bestehen hauptsächlich aus Wolfram (W), Nickel (Ni) und Kupfer (Cu). Das Verhältnis der drei Bestandteile wirkt sich direkt auf die Dichte, die mechanischen Eigenschaften und die Anwendungseigenschaften der Legierung aus. Wolfram, ein Element mit hoher Dichte ( $19,25\text{ g/cm}^3$ ), ist der Hauptbestandteil der Legierung und macht üblicherweise  $85\text{--}97\%$  des Massenanteils aus. Nickel und Kupfer füllen als Bindephasen die Lücken zwischen den Wolframpartikeln, verbessern die Zähigkeit und die Verarbeitungseigenschaften der Legierung und verringern die Härte (Vickershärte  $250\text{--}350\text{ HV}$ ), sodass sie leichter zu verarbeiten sind als reines Wolfram (Härte  $> 400\text{ HV}$ ). Der typische Zusammensetzungsbereich von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen beträgt:  $85\text{--}97\%$  Wolfram,  $2\text{--}10\%$  Nickel und  $1\text{--}8\%$  Kupfer. Das genaue Verhältnis wird je nach Anwendungsanforderungen angepasst.

In der Produktion bestimmt der Wolframgehalt die Dichte und Festigkeit der Legierung. Beispielsweise ist  $90\text{W-}7\text{Ni-}3\text{Cu}$  ( $90\%$  Wolfram,  $7\%$  Nickel,  $3\%$  Kupfer) eine gängige Formel mit einer Dichte von etwa  $17,0\text{ g/cm}^3$  und einer Zugfestigkeit von etwa  $750\text{--}850\text{ MPa}$ , die sich für Gegengewichte in der Luft-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Raumfahrt eignet. Durch Erhöhung des Wolframgehalts auf 95W-3,5Ni-1,5Cu kann eine Dichte von 18,0 g/cm<sup>3</sup> und eine Festigkeit von 800–900 MPa erreicht werden, was sich für den medizinischen Strahlenschutz eignet. Nickel verbessert die Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit, und seine Oxidationsbeständigkeit (Bildung einer NiO- Schutzschicht) ermöglicht der Legierung eine gute Leistung in feuchten oder chemischen Umgebungen. Die Zugabe von Kupfer verbessert nicht nur die Zähigkeit weiter, sondern macht die Legierung auch nichtmagnetisch (Kupfer ist ein paramagnetisches Material), wodurch sie in elektromagnetisch empfindlichen Umgebungen (wie etwa MRT-Geräten ) Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen überlegen ist. Die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer (ca. 400 W/ m · K) verbessert auch die Wärmeleitfähigkeit der Legierung, was ihr einen Vorteil in Szenarien verschafft, in denen eine schnelle Wärmeableitung erforderlich ist (wie etwa bei Ausgleichsblöcken für Fotolithografiemaschinen).

Bei der Auswahl des Zusammensetzungsverhältnisses muss ein Gleichgewicht zwischen Leistung und Kosten hergestellt werden. Je höher der Wolframgehalt, desto höher die Dichte und Festigkeit, aber auch die Verarbeitung wird schwieriger, und die Knappheit der Wolframressourcen treibt die Kosten in die Höhe. Das Verhältnis von Nickel und Kupfer muss genau kontrolliert werden. Ein zu hoher Nickelgehalt kann das Sensibilisierungsrisiko erhöhen (medizinische Anwendungen müssen den Biokompatibilitätstest nach ISO 10993 bestehen), und ein zu hoher Kupfergehalt kann die Festigkeit verringern. Bei der Herstellung wird die Legierung pulvermetallurgisch hergestellt. Nickel und Kupfer bilden während des Sinterprozesses eine flüssige Phase, die die Bindung der Wolframpartikel fördert, und die Dichte kann über 99,5 % erreichen. Die Qualitätskontrolle verwendet Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF) oder Atomemissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-AES), um die Zusammensetzung zu analysieren und die Genauigkeit von Wolfram ±0,5 %, Nickel ±0,2 % und Kupfer ±0,2 % sicherzustellen. Die Mikrostrukturanalyse (SEM-EDS) überprüft zusätzlich die gleichmäßige Verteilung der Wolframpartikel und die Integrität der Bindungsphase, um leistungsmindernde Poren oder Einschlüsse zu vermeiden. Durch Anpassung des Zusammensetzungsbereichs (z. B. Erhöhung des Nickelanteils auf 8 % zur Verbesserung der Zähigkeit) können spezifische Anwendungsanforderungen erfüllt werden, beispielsweise für Gegengewichte in Präzisionsinstrumenten oder militärische Abschirmteile.

### 1.1.2 Dichteklassifizierung und Anwendungszuordnung

Wolfram -Nickel-Kupfer-Legierungen bilden eine wichtige Grundlage für ihre Klassifizierung und Anwendung. Sie werden üblicherweise nach ihrem Wolframgehalt in verschiedene Güteklassen mit einem Dichtebereich von 16,5 g/cm<sup>3</sup> bis 18,5 g/cm<sup>3</sup> eingeteilt, entsprechend den unterschiedlichen Anwendungsszenarien. Die Dichteklassifizierung wirkt sich direkt auf die Gewichtungswirkung, die Abschirmleistung und die mechanischen Eigenschaften der Legierung aus und steht in engem Zusammenhang mit den spezifischen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt, der Medizin, der Präzisionsinstrumente und des Militärs. Internationale Normen wie ASTM B777 und ISO 20886 klassifizieren Wolframlegierungen nach ihrer Dichte in verschiedene Güteklassen. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen werden üblicherweise in Klasse 1 (16,5–17,0 g/cm<sup>3</sup>), Klasse 2 (17,0–17,5 g/cm<sup>3</sup>), Klasse 3 (17,5–18,0 g/cm<sup>3</sup>) und Klasse 4 (18,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>) unterteilt, und jede Klasse entspricht einer

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bestimmten Leistung und Anwendung.

Güten mit geringer Dichte (typische Formel 90W-7Ni-3Cu) eignen sich für Anwendungen, die mittlere Dichte und hohe Zähigkeit erfordern, wie z. B. Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt (Flugzeugquerruder oder Hubschrauberrotoren). Die geringere Dichte (im Vergleich zu hochwolframhaltigen Legierungen) reduziert die Materialkosten bei gleichbleibender Zugfestigkeit von 750–850 MPa und einer Dehnung von 10–15 %. Dadurch eignen sie sich für Teile, die Vibrationen oder Stößen ausgesetzt sind. Bei der Verarbeitung werden Klasse-1-Legierungen durch Flüssigphasensintern und maschinelle Bearbeitung (CNC oder EDM) geformt, um den hohen Präzisionsanforderungen der Luft- und Raumfahrt gerecht zu werden.

Güten mittlerer Dichte (typische Formel 93W-5Ni-2Cu oder 95W-3,5Ni-1,5Cu) werden häufig in der Medizin und bei Präzisionsinstrumenten verwendet. In medizinischen CT-/MRT-Geräten werden Legierungen der Klasse 2/3 zum Abschirmen von Komponenten verwendet, da sie Röntgen- und Gammastrahlen effizient absorbieren (Wolfram hat eine hohe Ordnungszahl  $Z=74$ ), um Personal und Geräte zu schützen. Seine nichtmagnetischen Eigenschaften stellen sicher, dass es das Magnetfeld des MRT nicht stört, was besser ist als bei Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Aufgrund seiner Zugfestigkeit von 800–900 MPa und seiner Wärmeleitfähigkeit ( $120\text{--}140\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) ist es für Hochtemperatur- oder dynamische Umgebungen geeignet, wie beispielsweise Kollimatoren von Strahlentherapiegeräten. Bei der Verarbeitung wird heißisostatisches Pressen verwendet, um eine Dichte von  $>99,5\%$  sicherzustellen, und Oberflächenbeschichtungen (wie PVD TiN) verbessern die Korrosions- und Verschleißbeständigkeit.

Hochdichte Güten (typische Formel 97W-2Ni-1Cu) werden in militärischen und hochwertigen Präzisionsinstrumenten wie panzerbrechenden Projektilkernen oder Ausgleichsblöcken für Fotolithografieplattformen verwendet. Die hohe Dichte sorgt für extrem hohe kinetische Energie bzw. einen Gegengewichtseffekt, und die Zugfestigkeit von 850–900 MPa gewährleistet extreme Belastbarkeit. Die Bearbeitung ist aufwendiger und erfordert CBN-Werkzeuge oder Laser-Mikrobearbeitung. Die Qualitätskontrolle überprüft Dichteabweichungen und Porosität nach ASTM B777, um eine gleichbleibende Leistung zu gewährleisten.

Bei der Optimierung der Dichteklassifizierung und der Anwendungszuordnung muss das Verhältnis zwischen Kosten und Leistung berücksichtigt werden. Hochdichte Werkstoffe sind teurer (hoher Wolframgehalt), eignen sich aber für hohe Leistungsanforderungen; niedrigdichte Werkstoffe sind wirtschaftlicher und für die Großserienproduktion geeignet. Additive Fertigung (z. B. SLM) ermöglicht die kundenspezifische Herstellung komplexer Formen und reduziert die Verarbeitungskosten. Zukünftig können durch die Entwicklung neuer Nickel-Kupfer-Verhältnisse oder die Zugabe von Spurenelementen (z. B. Kobalt) Dichte und Zähigkeit weiter optimiert und der Anwendungsbereich erweitert werden.

## 1.2 Entwicklungsgeschichte der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

Wolfram -Nickel-Kupfer-Legierungen finden aufgrund ihrer hervorragenden physikalischen und

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chemischen Eigenschaften breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin und in der Elektronikindustrie. Ihre Entwicklung durchlief mehrere Phasen von der Grundlagenforschung über die militärische Anwendung bis hin zur großflächigen Anwendung in der modernen Elektronikindustrie. Die technologischen Durchbrüche und die Marktnachfrage in jeder Phase haben die Leistungsoptimierung und Anwendungserweiterung der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung vorangetrieben und sie zu einem unverzichtbaren Werkstoff in der Hochtechnologie gemacht. In diesem Abschnitt werden die Entstehung und die frühen Forschungsarbeiten der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung, die Phase der militärischen Anwendung und der Entwicklungsprozess bis hin zur großflächigen Anwendung in der modernen Elektronikindustrie detailliert erläutert. Dabei werden zuverlässige Technologien und historische Daten berücksichtigt, ohne dass unzuverlässige Daten eine Rolle spielen.

### 1.2.1 Entstehung und frühe Forschung

Die Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung lässt sich bis ins frühe 20. Jahrhundert zurückverfolgen, als die Forschung an hochdichten Wolframlegierungen begann. Wolfram gilt aufgrund seiner hohen Dichte ( $19,25 \text{ g/cm}^3$ ) und seines hohen Schmelzpunkts ( $3422 \text{ °C}$ ) als ideale Wahl für die Herstellung von Hochleistungswerkstoffen. Die Sprödigkeit und die schwierige Verarbeitung von reinem Wolfram schränken seine Anwendung jedoch ein. Frühe Forschungen konzentrierten sich auf die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und der Bearbeitbarkeit von Wolfram durch Zugabe einer Bindephase. Die Einführung von Nickel und Kupfer als Bindephase beruht auf ihrer Fähigkeit, bei hohen Temperaturen eine flüssige Phase zu bilden, die die Bindung der Wolframpartikel fördert, während gleichzeitig die Härte der Legierung verringert und ihre Zähigkeit verbessert wird.

Von den 1930er bis in die 1950er Jahre legten Fortschritte in der Pulvermetallurgie den Grundstein für die Entwicklung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Forscher fanden heraus, dass Nickel und Kupfer durch Flüssigphasensintern eine gleichmäßige Bindungsphase zwischen Wolframpartikeln bilden können, wodurch die Dichte ( $> 99,5 \%$ ) und die mechanischen Eigenschaften der Legierung deutlich verbessert werden. Frühe Experimente untersuchten hauptsächlich die Auswirkungen unterschiedlicher Nickel-Kupfer-Verhältnisse auf die Eigenschaften der Legierung. Beispielsweise hat die Formel  $90\text{W}-7\text{Ni}-3\text{Cu}$  eine Dichte von etwa  $17,0 \text{ g/cm}^3$  und eine Zugfestigkeit von etwa  $750 \text{ MPa}$ , was sie für Gegengewichts- und Abschirmanwendungen geeignet macht. Im Gegensatz zu Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen verleiht die Kupferzugabe der Legierung nichtmagnetische Eigenschaften und macht sie somit für den Einsatz in elektromagnetisch sensiblen Umgebungen geeignet. Die Forschung konzentriert sich auch auf die Mikrostruktur der Legierung und analysiert die Wolframpartikelverteilung und Phasenstruktur durch metallografische Mikroskopie und Röntgenbeugung (XRD), um die Parameter des Sinterprozesses zu optimieren.

Die Entwicklung in diesem Zeitraum konzentrierte sich hauptsächlich auf Labore und Versuche im kleinen Maßstab mit begrenzten Anwendungsszenarien und wurde hauptsächlich für die Grundlagenforschung und industrielle Experimente genutzt. Beispielsweise wurde eine Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung aufgrund ihrer hohen Dichte und ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften, die denen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

von Blei oder Stahl überlegen sind, für Gegengewichtskomponenten früher Flugzeuge erprobt. Der Produktionsprozess basiert auf einfachen Pulverpress- und Sinteröfen mit geringer Verarbeitungsgenauigkeit (Toleranz  $\pm 0,1$  mm), was die Herstellung komplex geformter Teile einschränkt. Dennoch legten frühe Forschungen den theoretischen Grundstein für die Leistungsoptimierung und spätere Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen und etablierten deren Position im Bereich der hochdichten Legierungen.

### 1.2.2 Militäranwendungsorientierter Zeitraum

Von den 1960er bis in die 1990er Jahre wurde die Entwicklung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen maßgeblich durch die militärische Nachfrage vorangetrieben. Mit dem zunehmenden Wettrüsten während des Kalten Krieges stieg die Nachfrage nach Hochleistungswerkstoffen für Waffensysteme, insbesondere nach hochdichten, nicht magnetischen und hochfesten Materialien für Munition und Schutzausrüstung.

In militärischen Anwendungen werden Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen häufig zur Herstellung von Kernen panzerbrechender Projektile und Abschirmkomponenten verwendet. Im Vergleich zu Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen (die einen schwachen Ferromagnetismus aufweisen) eignen sich Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen aufgrund ihrer nichtmagnetischen Natur zur Vermeidung von Störungen für Komponenten von Radar- oder elektromagnetischen Navigationssystemen. Typische Formeln wie 93W-5Ni-2Cu (Dichte  $17,5 \text{ g/cm}^3$ ) werden in den Kernen panzerbrechender Projektile mit kinetischer Energie (APFSDS) verwendet und bieten eine hohe Durchschlagskraft bei gleichzeitig guter Zähigkeit, um Aufprallen mit hoher Geschwindigkeit standzuhalten. Die Legierung wird auch zur Herstellung von Abschirmteilen für Raketen oder Schiffe verwendet, um Radarwellen oder Strahlung zu absorbieren und elektronische Geräte zu schützen. Fortschritte in der Pulvermetallurgie, insbesondere die Einführung des heißisostatischen Pressens, haben die Dichte und die mechanischen Eigenschaften der Legierung deutlich verbessert, um militärischen Standards zu entsprechen.

Die Produktionstechnologie verbesserte sich in diesem Zeitraum deutlich. Moderne Sinteröfen und eine Atmosphärenkontrolle (hochreines Argon) reduzierten die Porosität und verbesserten die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur. Bearbeitungstechniken (wie CNC und EDM) erreichten eine hohe Präzision und ermöglichten die Herstellung komplex geformter Teile. Die Qualitätskontrolle nutzte Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF) und Rasterelektronenmikroskopie (REM-EDS), um Zusammensetzung (Wolfram  $\pm 0,5$  %) und Struktur zu überprüfen und so die Leistungskonsistenz sicherzustellen. Der starke militärische Bedarf führte dazu, dass Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen vom Labor in die industrielle Produktion übergingen, mit steigender Produktion und leicht reduzierten Kosten. Die Knappheit der Wolframressourcen schränkte jedoch weiterhin die großtechnische Anwendung ein.

### 1.2.3 Großflächige Anwendung in der modernen Elektronikindustrie

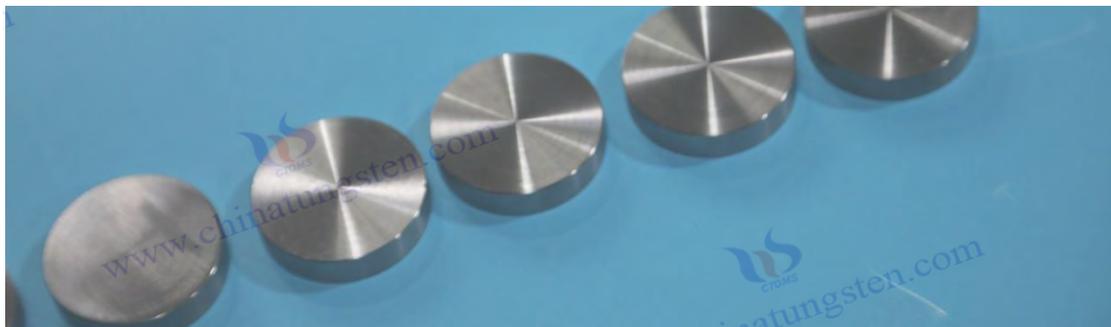
Zu Beginn des 21. Jahrhunderts ist die großflächige Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Legierungen in der Elektronikindustrie zu einem neuen Entwicklungsmotor geworden. Mit der rasanten Entwicklung der Halbleiter-, optischen Instrumenten- und Medizintechnikindustrie stieg die Nachfrage nach hochdichten, nicht magnetischen und hoch wärmeleitfähigen Materialien sprunghaft an. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen haben sich aufgrund ihrer nicht magnetischen Eigenschaften, ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu einem Schlüsselmaterial in der Elektronikindustrie entwickelt, insbesondere in den Bereichen Lithografiemaschinen, medizinische Bildgebungsgeräte und Präzisionsinstrumente.

In der Halbleiterfertigung werden Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen für Ausgleichsblöcke und schwingungsdämpfende Komponenten von Lithografieplattformen verwendet. In der Extrem-Ultraviolett-Lithografie (EUV) beispielsweise optimieren Ausgleichsblöcke aus 95W-3,5Ni-1,5Cu (Dichte 18,0 g/cm<sup>3</sup>) die dynamische Stabilität der Plattform, unterdrücken Vibrationen im Subnanometerbereich und gewährleisten die Genauigkeit der Mustergravur. Ihre nichtmagnetischen Eigenschaften vermeiden Interferenzen mit hochpräzisen elektromagnetischen Systemen, und ihre Wärmeleitfähigkeit leitet die vom Laser erzeugte Wärme schnell ab. Im medizinischen Bereich wird die Legierung in Abschirmkomponenten von CT-/MRT-Geräten eingesetzt, wo sie Röntgen- und Gammastrahlen (Wolfram-Ordnungszahl Z=74) effizient absorbiert und so Personal und Geräte schützt. Ihre Biokompatibilität (geprüft nach ISO 10993) macht sie für medizinische Anwendungen geeignet, und Oberflächenbeschichtungen (wie PVD TiN) verbessern die Korrosionsbeständigkeit und Sicherheit zusätzlich.

Produktionstechnisch hat die Einführung der additiven Fertigung (SLM) die Fertigungskapazität komplexer Bauteile deutlich verbessert und den Materialabfall reduziert. Umweltfreundliche Fertigungstechnologien (wie Mikrowellensintern und Abwärmerückgewinnung) senken den Energieverbrauch und erfüllen die Umweltschutznorm ISO 14001. Recyclingtechnologien (wie chemische Auflösung und elektrochemische Trennung) erhöhen die Wiederverwendungsquote von Altlegierungen und mindern den Druck der Wolfram-Ressourcenknappheit. Die Qualitätskontrolle überprüft Dichte, Festigkeit und Porosität nach ASTM B777, kombiniert mit Vibrationstests und Spektralanalyse, um die Leistungsfähigkeit der Komponenten sicherzustellen. Die große Nachfrage der Elektronikindustrie hat die Automatisierung der Produktion und die Optimierung der Lieferkette von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen vorangetrieben, was die Kosten weiter senkt und ihre breite Anwendung in Hightech-Bereichen ermöglicht.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Kapitel 2 Mikrostruktur der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist eine hochdichte Legierung mit Wolfram als Hauptbestandteil (normalerweise 85–97 Masseprozent) und Nickel und Kupfer als Bindephase. Ihre hervorragenden physikalischen und chemischen Eigenschaften, wie hohe Dichte (16,5–18,5 g/cm<sup>3</sup>), Zugfestigkeit (700–900 MPa), Dehnung (5–15 %), Nichtmagnetizität und gute Wärmeleitfähigkeit (120–150 W/ m·K), sind von ihrer Mikrostruktur unmittelbar abhängig. Die Mikrostruktur besteht hauptsächlich aus Wolframpartikeln und Nickel-Kupfer-Bindungsphasen. Durch pulvermetallurgische Verfahren wie Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen wird eine gleichmäßige und dichte Struktur erzeugt. Wolframpartikel sorgen für hohe Dichte und Festigkeit, während die Nickel-Kupfer-Bindungsphase Zähigkeit und Verarbeitungseigenschaften verbessert und der Legierung gleichzeitig nichtmagnetische Eigenschaften verleiht.

### 2.1 Mikrostrukturelle Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

Die mikrostrukturellen Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen bilden die Grundlage ihrer Eigenschaften. Diese zeigen sich in der Verteilung und Wechselwirkung von Wolframpartikeln und Nickel-Kupfer-Bindephasen im Mikrometerbereich. Wolframpartikel (kubisch-raumzentrierte Struktur, BCC) als Hauptphase nehmen 80–95 % des Legierungsvolumens ein und sorgen für hohe Dichte und Härte (Vickershärte 250–350 HV). Die Nickel-Kupfer-Bindephase (kubisch-flächenzentrierte Struktur, FCC) füllt die Lücken zwischen den Wolframpartikeln und bildet eine kontinuierliche Matrix, die Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit verbessert. Die Mikrostruktur wird mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM), energiedispersiver Spektroskopie (EDS) und Röntgenbeugung (XRD) charakterisiert und zeigt die gleichmäßige Verteilung der Wolframpartikel und die netzwerkartige Struktur der Nickel-Kupfer-Phasen. Durch Flüssigphasensintern bilden Nickel und Kupfer bei hohen Temperaturen eine flüssige Matrix, die die Neuordnung und Bindung der Wolframpartikel fördert. Die Dichte kann über 99,5 % erreichen. Heißisostatisches Pressen beseitigt zusätzlich Mikroporosität und gewährleistet strukturelle Homogenität. Diese Eigenschaften machen die Legierung zu einem idealen Werkstoff für Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt, medizinische Abschirmteile und Ausgleichsgewichte in der Elektronikindustrie. Die Verteilung der Wolframpartikel und der Nickel-Kupfer-Bindephase werden im Folgenden detailliert analysiert.

#### 2.1.1 Verteilung der Wolframpartikel

Wolframpartikel bilden den Kern der Mikrostruktur von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen und wirken sich direkt auf die Dichte, Festigkeit und thermische Stabilität der Legierung aus. Wolframpartikel sind üblicherweise polygonal oder nahezu kugelförmig, mit einer Partikelgröße von 10–50 µm, und die genaue Größe hängt von der Partikelgröße des Rohpulvers und den Parametern des Sinterprozesses ab. In einer typischen Formel (wie 90W-7Ni-3Cu oder 95W-3,5Ni-1,5Cu) machen Wolframpartikel 80–95 % des Volumenanteils aus und bilden eine hochdichte Skelettstruktur, die die Hauptmasse (Dichte 16,5–18,5 g/cm<sup>3</sup>) und Härte (Vickershärte 250–350 HV) der Legierung ausmacht. Bei der REM-Beobachtung sind Wolframpartikel gleichmäßig verteilt, ohne offensichtliche

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Agglomeration oder Poren, und der Kontakt zwischen den Partikeln ist eng und die Grenzen sind klar. Diese gleichmäßige Verteilung ist auf den Benetzungseffekt der Nickel-Kupfer-Flüssigphase während des Flüssigphasensinterns zurückzuführen, der die Wolframpartikel dazu veranlasst, sich neu anzuordnen und eine dichte Struktur zu bilden.

Wolframpartikel werden von vielen Faktoren beeinflusst. Erstens ist die Qualität des Rohpulvers entscheidend. Hochreines Wolframpulver (Reinheit > 99,9 %) wird durch Zerstäubung oder Reduktion hergestellt, um nach dem Sintern eine gleichmäßige Partikelgröße zu gewährleisten. Zu große Pulverpartikel können zu größeren Partikellücken und reduzierter Dichte führen; zu kleine Partikel können die Sinterschrumpfung erhöhen und Verformungen oder Risse verursachen. Zweitens haben die Parameter des Sinterprozesses einen erheblichen Einfluss auf die Partikelverteilung. Eine geeignete Sintertemperatur ermöglicht der flüssigen Nickel-Kupfer-Phase, die Wolframpartikel vollständig zu benetzen und deren Neuordnung zu fördern; zu hohe Temperaturen können zu übermäßigem Wachstum der Wolframpartikel führen und die Zähigkeit verringern. Heißisostatisches Pressen (HIP) verdichtet die Partikel durch hohen Druck und hohe Temperaturen zusätzlich, eliminiert Mikroporen und verbessert die Kontaktfestigkeit zwischen den Partikeln. Die XRD-Analyse zeigt, dass die Wolframpartikel eine BCC-Struktur beibehalten, keine nennenswerte Mischkristallbildung mit der Nickel-Kupfer-Phase eingehen und ihre hohe Härte und thermische Stabilität bewahren.

Die Wolframpartikelverteilung ist entscheidend für die Leistungsfähigkeit der Legierung. Sie gewährleistet eine gleichmäßige Dichte und sorgt für eine stabile Schwerpunktkontrolle in Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt. Eine hohe Dichte erhöht die Zugfestigkeit und eignet sich für militärische panzerbrechende Kerne, um hohen Stoßbelastungen standzuhalten. Mittels SEM-EDS-Analyse wird die Gleichmäßigkeit der Partikelverteilung überprüft, um Einschlüsse oder Entmischungen auszuschließen. Die Qualitätskontrolle erfolgt nach ASTM B777. Dichtepfahrungen und metallografische Analysen bestätigen, dass die Partikelverteilung den Anforderungen entspricht.

### 2.1.2 Verteilung der Ni-Cu-Bindungsphase

Die Nickel-Kupfer-Bindungsphase spielt eine Schlüsselrolle in der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung. Sie füllt die Lücken zwischen den Wolframpartikeln, bildet eine kontinuierliche Matrixstruktur und verbessert so die Zähigkeit, Bearbeitbarkeit und nichtmagnetischen Eigenschaften der Legierung deutlich. Die Nickel-Kupfer-Phase liegt in einer kubisch-flächenzentrierten (FCC) Struktur vor und macht üblicherweise 5–20 % des Volumenanteils aus. Der genaue Anteil hängt von der Legierungsformel ab (z. B. 10 % Nickel-Kupfer-Massenanteil in 90W-7Ni-3Cu). Durch SEM-Beobachtung ist die Nickel-Kupfer-Phase netzwerkartig verteilt und umhüllt die Wolframpartikel zu einer gleichmäßigen Bindungsmatrix. Die EDS-Analyse zeigt, dass Nickel und Kupfer in der Bindungsphase eine feste Lösung (Ni-Cu-Legierung) ohne offensichtliche Phasentrennung bilden und das Nickel-Kupfer-Atomverhältnis nahe am Sollverhältnis (z. B. 7:3 oder 3,5:1,5) liegt. Diese gleichmäßige Verteilung ist auf die niedrigen Schmelzpunkte von Nickel (Schmelzpunkt 1455 °C) und Kupfer (Schmelzpunkt 1085 °C) während des Flüssigphasensinterprozesses zurückzuführen, wodurch eine flüssige Phase entsteht, die die Wolframpartikel benetzt, die Lücken füllt und die Verdichtung fördert.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Verteilungseigenschaften der Nickel-Kupfer-Bindephase beeinflussen maßgeblich die Eigenschaften der Legierung. Nickel bietet eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit (Bildung einer NiO-Schutzschicht), wodurch die Legierung in feuchten oder chemischen Umgebungen (z. B. in Sterilisationsumgebungen für medizinische Geräte) stabil bleibt. Die Zugabe von Kupfer erhöht die Wärmeleitfähigkeit, was sich für Ausgleichsblöcke oder Abschirmteile in der Elektronikindustrie eignet, die eine schnelle Wärmeableitung erfordern. Der größte Vorteil der Nickel-Kupfer-Phase ist ihre Nichtmagnetizität. Da Nickel und Kupfer beide paramagnetische Materialien sind, werden ferromagnetische Interferenzen vermieden, was für elektromagnetisch empfindliche Anwendungen wie MRT-Geräte oder Fotolithografiemaschinen von Vorteil ist. Die Zähigkeit der Nickel-Kupfer-Phase gleicht die Sprödigkeit der Wolframpartikel aus und macht die Legierung weniger anfällig für Risse bei der Verarbeitung (z. B. CNC-Drehen, Fräsen) oder dynamischen Belastungen (z. B. in Vibrationsumgebungen in der Luft- und Raumfahrt). Die Optimierung des Sinterprozesses ist der Schlüssel zur Erzielung einer gleichmäßigen Verteilung. Beim Flüssigphasensintern müssen Temperatur und Atmosphäre (hochreines Argon) kontrolliert werden, um ein übermäßiges Fließen der Nickel-Kupfer-Flüssigphase und damit verbundene Entmischung zu vermeiden. Durch heißisostatisches Pressen (HIP) wird die Bindephase zusätzlich verdichtet, Mikroporen werden eliminiert und die Matrixkontinuität sichergestellt.

Auch die Verteilung der Nickel-Kupfer-Phasen ist mit einigen Herausforderungen verbunden. Ein zu hoher Nickelgehalt kann das Sensibilisierungsrisiko erhöhen und erfordert bei medizinischen Anwendungen eine Biokompatibilitätsprüfung nach ISO 10993. Ein zu hoher Kupfergehalt kann die Festigkeit mindern, da die Festigkeit der Ni-Cu-Mischkristalle geringer ist als die von Wolframpartikeln. Bei der Bearbeitung kann die Duktilität der Nickel-Kupfer-Phase zu Verklebungen oder Oberflächengraten führen, sodass die Schneidparameter (z. B. Niedriggeschwindigkeitsschneiden, CBN-Werkzeuge) optimiert werden müssen. Die Qualitätskontrolle analysiert die Verteilung und Zusammensetzung der Nickel-Kupfer-Phase mittels SEM-EDS und XRD, um die Homogenität des Mischkristalls zu überprüfen. Oberflächenbehandlungen (z. B. PVD- TiN- oder DLC-Beschichtung) können die Korrosions- und Verschleißfestigkeit verbessern und die Lebensdauer der Komponenten verlängern. Zukünftig kann die additive Fertigungstechnologie durch präzise Steuerung der Pulververhältnisse und Druckparameter (z. B. Laserleistung) eine maßgeschneiderte Verteilung der Nickel-Kupfer-Phasen erreichen und so die Leistung der Legierung in medizinischen Abschirmteilen oder elektronischen Ausgleichsgewichten weiter optimieren.

### 2.1.3 Mechanismus der Sinterhalsbildung

Die Bildung des Sinterhalses ist der Schlüsselmechanismus für die Verdichtung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen während des Flüssigphasensinterns und beeinflusst direkt die Mikrostruktur, die mechanischen Eigenschaften und die Dichte (> 99,5 %) der Legierung. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen werden pulvermetallurgisch hergestellt. Das Flüssigphasensintern ist der zentrale Schritt. Nickel (Schmelzpunkt 1455 °C) und Kupfer (Schmelzpunkt 1085 °C) bilden bei hoher Temperatur eine flüssige Matrix, benetzen die Wolframpartikel (Schmelzpunkt 3422 °C, bleiben fest), fördern die Bindung zwischen den Partikeln und bilden den Sinterhals. Der Sinterhals ist der Verbindungsbereich,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der durch die Flüssigphasenbrücke zwischen den Wolframpartikeln entsteht und die strukturelle Integrität und Festigkeit der Legierung verbessert.

Zu Beginn des Sinterns werden Wolframpulver (Partikelgröße 10–50  $\mu\text{m}$ ), Nickelpulver und Kupferpulver gemischt und zu einem Rohling gepresst. Der anfängliche Kontaktpunkt ist ein Punktkontakt und der Abstand zwischen den Partikeln ist groß. Wenn die Temperatur auf ein bestimmtes Niveau steigt, schmelzen Nickel und Kupfer und bilden eine flüssige Ni-Cu-Phase. Aufgrund ihrer niedrigen Oberflächenspannung und guten Benetzbarkeit mit Wolfram (Kontaktwinkel  $< 30^\circ$ ) füllt die flüssige Phase schnell den Abstand zwischen den Wolframpartikeln und benetzt die Partikeloberfläche durch Kapillarkwirkung. Die Benetzung der flüssigen Phase fördert die Neuordnung der Partikel, wodurch sich die Wolframpartikel bewegen und annähern, um eine kompaktere Stapelstruktur zu bilden. Mit zunehmender Haltezeit wirkt die flüssige Phase durch Diffusion und Lösungs-Umfällungsmechanismen weiter auf die Wolframpartikel ein. Eine kleine Menge Wolframatome löst sich in der flüssigen Phase und scheidet sich am Kontaktpunkt der Partikel erneut ab, wodurch ein Sinterhals entsteht. Das Wachstum des Sinterhalses verstärkt die Bindungskraft zwischen den Partikeln und verbessert die Dichte der Legierung erheblich.

Im späteren Stadium des Sinterns füllt die flüssige Phase weiterhin die verbleibenden Poren und beseitigt winzige Poren durch Diffusion und Massentransfer. Durch heißisostatisches Pressen wird die Struktur weiter verdichtet und verbleibende Poren beseitigt. Die Dichte kann 99,5 % erreichen. Die Sinterhalsbeobachtung zeigt, dass der Sinterhals eine bogen- oder brückenförmige Struktur ist, die benachbarte Wolframpartikel zu einem dreidimensionalen Skelettnetzwerk verbindet. Die XRD-Analyse bestätigt, dass die Wolframpartikel eine kubisch-raumzentrierte (BCC) Struktur ohne nennenswerte feste Lösung beibehalten und die Ni-Cu-feste Lösung in der flüssigen Phase eine kubisch-flächenzentrierte (FCC) Struktur aufweist. Die Bildung des Sinterhalses wird durch Prozessparameter beeinflusst: Eine zu hohe Temperatur kann zu übermäßigem Fließen der flüssigen Phase führen, was Nickel-Kupfer-Entmischung oder übermäßiges Wachstum von Wolframpartikeln zur Folge hat und die Zähigkeit verringert. Eine zu niedrige Temperatur führt zu unzureichender flüssiger Phase, unvollständigem Sinterhals und verringerter Dichte. Das Nickel-Kupfer-Verhältnis (typischerweise 7:3 oder 3,5:1,5) beeinflusst ebenfalls die Menge der flüssigen Phase. Ein hoher Nickelgehalt erhöht die Fließfähigkeit der flüssigen Phase und fördert das Wachstum des Sinterhalses, kann aber die Festigkeit verringern; ein hoher Kupfergehalt senkt den Schmelzpunkt der flüssigen Phase, was zwar für das Sintern von Vorteil ist, aber zur Entmischung führen kann.

Die Bildung von Sinterhälsen ist entscheidend für die Leistung. Enge Sinterhälsen verbessern die Partikelbindung, erhöhen die Zugfestigkeit (700–900 MPa) und Zähigkeit und eignen sich für Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt oder militärische panzerbrechende Kerne, um hohen Belastungen standzuhalten. Eine gleichmäßige Verteilung der Sinterhälsen gewährleistet eine gleichbleibende Dichte und sorgt für eine stabile Strahlungsabsorption in medizinischen Abschirmteilen. Die Qualitätskontrolle analysiert die Morphologie und Zusammensetzung der Sinterhälsen mittels metallografischer Mikroskopie und SEM-EDS, um Porosität und Flüssigphasenverteilung zu überprüfen. Zukünftig kann der Einsatz von nanoskaligem Wolframpulver oder Schnellsintertechnologien (wie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Spark-Plasma-Sintern, SPS) die Sinterhalsbildung optimieren, die Sinterzeit verkürzen, die Effizienz verbessern und die Leistung erhalten.

## 2.2 Mikrostruktur und Grenzflächeneigenschaften der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

Wolfram -Nickel-Kupfer-Legierungen, insbesondere die Grenzflächenbindungsstärke zwischen Wolframpartikeln und der Nickel-Kupfer-Bindungsphase, spielen eine entscheidende Rolle für die mechanischen Eigenschaften, die thermische Stabilität und die Haltbarkeit der Legierung. Die Grenzflächenbindungsstärke bestimmt die Zuverlässigkeit der Legierung unter dynamischen Belastungen (wie Vibrationen oder Stößen) oder in Hochtemperaturumgebungen und wirkt sich direkt auf ihre Anwendungseigenschaften in Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt, medizinischen Abschirmteilen und Ausgleichsblöcken in der Elektronikindustrie aus. Die Grenzfläche zwischen Wolframpartikeln (BCC-Struktur) und der Nickel-Kupfer-Bindungsphase (FCC-Struktur) wird durch Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen fest verbunden und weist eine ausgezeichnete mechanische und chemische Stabilität auf.

### 2.2.1 Bindungsstärke der Wolfram-Bindemittel-Phasengrenzfläche

Die Bindungsstärke der Wolfram-Bindemittel-Phasengrenzfläche ist ein wesentliches Merkmal der Mikrostruktur der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung, das die Zugfestigkeit, Zähigkeit und Ermüdungsbeständigkeit der Legierung bestimmt. Die Grenzflächenbindung entsteht durch Benetzung und Diffusion der flüssigen Nickel-Kupfer-Phase während des Flüssigphasensinterprozesses. Die Oberfläche der Wolframpartikel bildet eine halbkohärente oder nichtkohärente Grenzfläche mit der Ni-Cu-Festlösung. Die Bindungsstärke beruht hauptsächlich auf mechanischer Interkalation, chemischer Bindung und Diffusion. Die SEM-Beobachtung zeigt, dass die Grenzfläche eine kontinuierliche und glatte Übergangszone mit einer Dicke von etwa 0,1–1 µm ohne sichtbare Risse oder Poren ist. Die EDS-Analyse zeigt, dass an der Grenzfläche eine leichte Elementdiffusion stattfindet und sich eine kleine Menge Wolframatome in der Nickel -Kupfer-Phase auflöst, um eine Übergangsschicht zu bilden und die Bindungskraft zu erhöhen. Die Festigkeit der Grenzflächenbindung wird durch Zugfestigkeitsprüfungen (ASTM E8) und fraktografische Analysen ermittelt, die normalerweise eine hohe Scherfestigkeit und eine gute Bruchzähigkeit zeigen.

Flüssigphasensintern ist ein Schlüsselprozess für die Bildung von Grenzflächenbindungen. Bei 1450–1550 °C verschmelzen Nickel und Kupfer zu einer Ni-Cu-Flüssigphase, die die Wolframpartikel benetzt (Benetzungswinkel < 30°) und die Zwischenräume zwischen den Partikeln durch Kapillarwirkung füllt. Die niedrige Oberflächenspannung und der hohe Diffusionskoeffizient der Flüssigphase fördern die Mikroauflösung der Wolframoberfläche (Löslichkeit < 2 Gew.-%) und bilden so eine chemische Bindung. Im späteren Sinterstadium verfestigt sich die Flüssigphase zu einer Ni-Cu-Feststofflösung mit FCC-Struktur, die die Wolframpartikel umhüllt. Die mechanische Verzahnung verstärkt die Grenzflächenbindung zusätzlich. Heißisostatisches Pressen (HIP) komprimiert die Grenzfläche unter hohem Druck, eliminiert Mikroporen, vergrößert die Kontaktfläche und verbessert die Bindungsstärke. Die Qualität der Grenzflächenbindung wirkt sich direkt auf die Leistungsfähigkeit der Legierung aus. Bei Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt stellt eine hohe Bindungsstärke sicher, dass die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Komponenten bei hochfrequenten Vibrationen keine Ablösung der Grenzflächen erfahren. Bei medizinischen Abschirmteilen gewährleistet eine stabile Grenzfläche eine langfristige Nutzung ohne Leistungseinbußen. Die Bindungsstärke an der Grenzfläche wird von vielen Faktoren beeinflusst. Die Reinheit ( $> 99,9\%$ ) und der Oberflächenzustand (z. B. Oxidgehalt  $< 0,1\%$ ) des Wolframpulvers sind entscheidend für die Benetzbarkeit. Oxide können Grenzflächendefekte verursachen und die Bindungsstärke verringern. Das Nickel-Kupfer-Verhältnis (normalerweise 7:3) beeinflusst die Menge der flüssigen Phase und die Eigenschaften der festen Lösung. Ein zu hoher Nickelgehalt kann zu übermäßiger flüssiger Phase an der Grenzfläche führen und so Entmischung verursachen. Ein zu hoher Kupfergehalt ( $> 8\%$ ) verringert die Festigkeit der festen Lösung. Die Sinterparameter müssen genau kontrolliert werden. Eine zu hohe Temperatur kann zu einer übermäßigen Auflösung der Wolframpartikel führen, wodurch die Grenzfläche erweitert, aber die Festigkeit verringert wird. Eine zu niedrige Temperatur kann zu unzureichender flüssiger Phase und unvollständiger Grenzflächenbindung führen. Die Qualitätskontrolle nutzt TEM und EBSD, um die Mikrostruktur der Grenzfläche zu analysieren und die kristallografische Übereinstimmung sowie die Defektverteilung zu überprüfen. Die Bruchanalyse zeigt, dass es sich bei der Bruchart der Grenzfläche hauptsächlich um einen duktilen Bruch handelt, der Grübchencharakteristika aufweist.

Die Optimierung der Grenzflächenhaftung erfordert verbesserte Prozesse. Die Verwendung von nanoskaligem Wolframpulver kann die Kontaktfläche der Grenzfläche vergrößern und die Haftfestigkeit ( $> 600\text{ MPa}$ ) verbessern. Schnellsinterverfahren (z. B. SPS) reduzieren übermäßige Grenzflächendiffusion durch kurzzeitig hohe Temperaturen und erhalten die strukturelle Stabilität. Oberflächenbehandlungen (z. B. PVD- $\text{TiN}$ -Beschichtung) können die Korrosionsbeständigkeit der Grenzfläche erhöhen und die Lebensdauer medizinischer oder elektronischer Komponenten verlängern.

### 2.2.2 Auswirkungen von Spurenelementen auf die Grenzfläche

Die Bindungsstärke der Wolfram-Bindemittel-Grenzfläche von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen ist ein entscheidender Faktor für deren mechanische Eigenschaften und Zuverlässigkeit, und die Einführung von Spurenelementen wirkt sich erheblich auf die Grenzflächeneigenschaften aus. Spurenelemente (wie Kobalt, Molybdän, Chrom, Kohlenstoff oder Sauerstoff, üblicherweise  $< 0,5\%$  Gew.-%) können aus Verunreinigungen im Rohpulver stammen oder absichtlich hinzugefügt werden, um die Grenzflächenbindung, die mechanischen Eigenschaften oder die Korrosionsbeständigkeit zu optimieren. Diese Elemente beeinflussen die Bindungsstärke (Scherfestigkeit  $> 500\text{ MPa}$ ) zwischen Wolframpartikeln und Ni-Cu-Feststofflösung (FCC-Struktur), indem sie die Benetzbarkeit, das Diffusionsverhalten und die Grenzflächenmikrostruktur der flüssigen Nickel-Kupfer-Phase verändern. Bei Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt, medizinischen Abschirmteilen und Ausgleichsblöcken in der Elektronikindustrie steht die Optimierung der Grenzflächenstärke in direktem Zusammenhang mit der Langzeitstabilität und Ermüdungsbeständigkeit der Komponenten.

Nickel eine stabilere FCC-Feststofflösung bilden und so die Festigkeit und Zähigkeit der Bindungsphase verbessern. Eine SEM-EDS-Analyse zeigt, dass Kobalt gleichmäßig in der Nickel-Kupfer-Phase verteilt ist, wodurch die Benetzbarkeit der Flüssigphase beim Flüssigphasensintern erhöht wird (der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kontaktwinkel wird auf  $<25^\circ$  reduziert), das Wachstum von Sinterhälsen gefördert und die Festigkeit der Grenzflächenbindung verbessert wird (die auf 550–600 MPa erhöht werden kann). Kobalt hemmt außerdem die Auflösung von Wolfram an der Grenzfläche, verringert die Dicke der Grenzflächenübergangsschicht, hält die Grenzfläche klar und verringert das Rissrisiko. Ein zu hoher Kobaltgehalt kann jedoch zu einer Entmischung der Grenzfläche führen und die Zähigkeit verringern. Spuren von Molybdän können aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts ( $2623^\circ\text{C}$ ) und ihrer ähnlichen Kristallstruktur (BCC) wie Wolfram die chemische Bindung an der Grenzfläche verbessern und die Hochtemperaturbeständigkeit erhöhen. Dadurch eignet es sich für Kerne militärischer panzerbrechender Geschosse oder hochtemperaturbeständige elektronische Bauteile. Molybdän stärkt die Nickel-Kupfer-Phase durch Mischkristallbildung und erhöht die Scherfestigkeit an der Grenzfläche. Zu hohe Mengen können jedoch zu einer Versprödung der Grenzfläche führen.

Spuren von Kohlenstoff und Sauerstoff sind üblicherweise als Verunreinigungen vorhanden, die von Wolframpulveroxiden oder der Sinteratmosphäre (unzureichende Argonreinheit) stammen können. Kohlenstoff bildet an der Grenzfläche Carbide (wie WC oder Ni-C-Verbindungen), was die lokale Härte erhöhen kann (die Vickershärte steigt auf 400 HV), aber auch Spannungskonzentrationen an der Grenzfläche verursachen und die Bruchzähigkeit verringern kann. Sauerstoff kann Oxideinschlüsse (wie  $\text{WO}_3$  oder NiO) bilden, die die Grenzflächenbindung schwächen und zum Versagen von medizinischen Abschirmungen oder Luft- und Raumfahrtkomponenten unter dynamischer Belastung führen. Die Kontrolle des Verunreinigungsgehalts erfordert hochreine Rohstoffe und eine hochreine Argonatmosphäre. Spuren von Chrom können die Korrosionsbeständigkeit der Nickel-Kupfer-Phase erhöhen (indem es eine  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -Schutzschicht bildet), haben wegen seiner begrenzten Löslichkeit jedoch wenig Einfluss auf die Grenzflächenbindung. Die Charakterisierung der Grenzflächeneffekte erfolgte mittels Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) und Elektronenrückstreubeugung (EBSD), um die Spurenelementverteilung und die kristallographischen Eigenschaften der Grenzfläche zu überprüfen. Zugversuche (ASTM E8) und Bruchanalysen zeigten, dass die Grenzfläche mit optimierten Spurenelementen duktile Brucheigenschaften (Grübchen) aufwies, während übermäßige Verunreinigungen zu sprödem Bruch führten. Die Prozessoptimierung erfordert eine strenge Kontrolle des Spurenelementgehalts (ICP-AES-Erkennungsgenauigkeit  $\pm 0,01\%$ ) und die Beseitigung von Grenzflächendefekten durch heißisostatisches Pressen.

### 2.3 Mikrostrukturelle Entwicklung der W-Ni-Cu-Legierung

Die mikrostrukturelle Entwicklung von WNiCu-Legierungen erfolgt während des gesamten Produktionsprozesses, vom Pulverpressen über das Sintern bis zur Wärmebehandlung. Dabei kommt es zu dynamischen Veränderungen des Kornwachstums, der Phasenverteilung und der Grenzflächenstruktur. Diese Veränderungen wirken sich direkt auf Dichte, Festigkeit und Zähigkeit der Legierung aus, was wiederum ihre Leistungsfähigkeit in Gegengewichten für die Luft- und Raumfahrt, medizinischen Abschirmteilen und Ausgleichsblöcken in der Elektronikindustrie bestimmt. Flüssigphasensintern und Wärmebehandlung sind Schlüsselprozesse zur Steuerung der Mikrostrukturentwicklung. Die ideale Mikrostruktur kann durch die Optimierung von Prozessparametern wie Temperatur, Haltezeit und Atmosphäre erreicht werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 2.3.1 Kornwachstumsgesetz beim Sintern

Das Kornwachstumsgesetz während des Sinterns ist der Kern der mikrostrukturellen Entwicklung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen, die die Wolframpartikelgröße, die Sinterhalsbildung und die Legierungseigenschaften direkt beeinflusst. Das Flüssigphasensintern ist der Hauptprozess, der die drei Phasen Partikelumordnung, Auflösung-Wiederausfällung und Festkörperdiffusion umfasst und das Wachstum der Wolframpartikel (BCC-Struktur, anfängliche Partikelgröße 10 – 50  $\mu\text{m}$ ) und die mikrostrukturelle Verdichtung vorantreibt. In der frühen Phase des Sinterns werden Wolframpulver, Nickelpulver und Kupferpulver zu Knüppeln gepresst. Wenn die Temperatur auf ein bestimmtes Niveau steigt, schmelzen Nickel und Kupfer und bilden eine flüssige Ni-Cu-Phase, die die Wolframpartikel benetzt und die Partikelumordnung durch Kapillarwirkung vorantreibt. In dieser Phase ist das Kornwachstum begrenzt und die Partikel behalten ihre anfängliche Größe.

Während des Sinterns (1–2 Stunden Halten) fördert die Flüssigphase das Kornwachstum durch den Lösungs-Wiederausfällungsmechanismus. Eine kleine Menge Wolframatome löst sich in der Flüssigphase auf und scheidet sich an den Kontaktpunkten der Partikel wieder aus, wodurch ein Sinterhals entsteht. Das Kornwachstum folgt dem Ostwaldschen Reifungsgesetz. Große Partikel wachsen, indem sie kleine Partikel einschließen, und die Partikelgrößenverteilung wird breiter. Sintertemperatur und Haltezeit sind wichtige Einflussfaktoren: Eine zu hohe Temperatur oder eine zu lange Haltezeit führt zu übermäßigem Wachstum und verringerter Zähigkeit; eine zu niedrige Temperatur führt zu unzureichender Flüssigphase, langsamem Kornwachstum und verringerter Dichte. Das Nickel-Kupfer-Verhältnis (typischerweise 7:3) beeinflusst ebenfalls die Menge der Flüssigphase. Ein hoher Nickelgehalt erhöht die Fließfähigkeit der Flüssigphase und fördert das Kornwachstum, kann aber auch zur Entmischung führen; ein hoher Kupfergehalt verringert die Viskosität der Flüssigphase und beschleunigt das Wachstum, kann aber die Festigkeit verringern.

Im späteren Sinterstadium verdichtet die Festkörperdiffusion die Struktur weiter, und die Porosität wird auf <1 % reduziert. Heißisostatisches Pressen unterdrückt übermäßiges Kornwachstum durch Kompression der Partikel unter hohem Druck. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Körner polygonal oder nahezu kugelförmig sind und die Sinterhalse gleichmäßig verteilt sind. XRD bestätigt, dass das Wolfram eine BCC-Struktur ohne signifikante Phasenänderungen aufweist. Die Kontrolle des Kornwachstumsgesetzes ist entscheidend für die Leistung: Eine moderate Partikelgröße gewährleistet hohe Festigkeit und Zähigkeit, geeignet für medizinische Kollimatoren; eine größere Partikelgröße sorgt für eine hohe Dichte, geeignet für militärische Projektilkerne.

### 2.3.2 Regulierung der Mikrostruktur durch Wärmebehandlung

Die Wärmebehandlung ist ein wichtiges Mittel zur Regulierung der Mikrostruktur von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Sie optimiert mechanische Eigenschaften, Korrosionsbeständigkeit und thermische Stabilität durch Anpassung von Korngröße, Grenzflächenbindung und Eigenspannung. Die Wärmebehandlung erfolgt üblicherweise nach dem Sintern und umfasst Glühen, Altern oder Abschrecken. Der spezifische Prozess wird entsprechend den Anwendungsanforderungen konzipiert.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Glühen ist die am häufigsten verwendete Wärmebehandlungsmethode. Ziel ist es, Eigenspannungen während des Sinterns und der Verarbeitung zu beseitigen, die Zähigkeit und die Verarbeitungsleistung zu verbessern und gleichzeitig die hohe Dichte und die nichtmagnetischen Eigenschaften der Legierung zu erhalten.

Der Glühprozess reguliert die Mikrostruktur durch Diffusion und Rekristallisation. Bei hohen Temperaturen werden Kristalldefekte (wie Versetzungen und Korngrenzen) in der Nickel-Kupfer-Bindungsphase (FCC-Struktur) durch Diffusion repariert, um innere Spannungen abzubauen. Wolframpartikel (BCC-Struktur) unterliegen aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts (3422 °C) keiner nennenswerten Rekristallisation. Spuren von Wolfram, die an der Grenzfläche gelöst sind, glätten diese jedoch zusätzlich und erhöhen die Bindungsfestigkeit (Scherfestigkeit > 550 MPa). Zu hohe Glühtemperaturen können Kornwachstum in der Nickel-Kupfer-Phase fördern und die Festigkeit verringern; zu niedrige Temperaturen führen zu unzureichendem Spannungsabbau und nur einer begrenzten Verbesserung der Zähigkeit. Eine Alterungsbehandlung kann die Festigkeit der Bindungsphase durch Ausscheidung einer Spurenmenge einer zweiten Phase (z. B. Ni<sub>3</sub>Cu) in der Ni-Cu-Mischkristalllösung erhöhen. Übermäßige Ausscheidung sollte jedoch vermieden werden, da dies zu Versprödung führt.

Wärmebehandlung kann auch die Korrosionsbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit regulieren. Nach dem Glühen bildet sich auf der Oberfläche der Nickel-Kupfer-Phase eine dichte NiO-Schutzschicht, die die Korrosionsbeständigkeit erhöht (die Säurebeständigkeit erhöht sich um 20–30 %) und sich für den Langzeiteinsatz medizinischer Geräte eignet. Die Wärmeleitfähigkeit wird durch Optimierung der Korngrenzenverteilung leicht verbessert, was für Wärmeableitungskomponenten in der Elektronikindustrie von Vorteil ist. TEM- und EBSD-Analysen zeigen, dass die Grenzflächenübergangsschicht nach der Wärmebehandlung gleichmäßiger ist, die Korngrenzendefekte reduziert sind und der Bruch Zähigkeitseigenschaften aufweist. Die Qualitätskontrolle überprüft die Leistungsverbesserung durch Zugprüfungen (ASTM E8) und Härteprüfungen (ASTM E92). Die Wärmebehandlung muss in hochreinem Argon durchgeführt werden, um Oxideinschlüsse zu vermeiden.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### 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 Physikalische und chemische Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist ein Hochleistungswerkstoff mit hoher Dichte, der aufgrund seiner einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften in der Luft- und Raumfahrt, Medizin, Elektronik und im Militärbereich weit verbreitet ist. Diese Legierung besteht hauptsächlich aus Wolfram, ergänzt durch Nickel und Kupfer als Bindephase. Dadurch entsteht eine hochdichte, mechanisch hervorragende und nicht magnetische Struktur. Die hohe Dichte gewährleistet eine effiziente Massenverteilung auf begrenztem Raum. Die Nickel-Kupfer-Bindungsphase verleiht der Legierung gute Zähigkeit und Bearbeitbarkeit, und die nichtmagnetischen Eigenschaften ermöglichen eine gute Leistung in elektromagnetisch empfindlichen Umgebungen.

### 3.1 Mechanische Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

Die Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung bietet ihre Hauptvorteile bei Hochleistungsanwendungen, insbesondere in Szenarien, die mechanischer Belastung, Vibration oder Stößen standhalten müssen, wie z. B. Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt, medizinische Kollimatoren oder panzerbrechende Kerne im Militär. Die mechanischen Eigenschaften umfassen hauptsächlich Zugfestigkeit, Dehnung, Härte und Ermüdungsbeständigkeit, die sich aus dem synergistischen Effekt der hohen Härte der Wolframpartikel und der Zähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase ergeben. Die Legierung wird pulvermetallurgisch hergestellt, und die Flüssigphasensinter- und heißisostatischen Pressprozesse gewährleisten eine dichte Mikrostruktur, wodurch die strukturelle Integrität in einer dynamischen Umgebung erhalten bleibt. Im Vergleich zur Sprödigkeit von reinem Wolfram verbessert die Nickel-Kupfer-Bindungsphase die Plastizität und Bearbeitbarkeit der Legierung erheblich, sodass sie den Fertigungsanforderungen komplexer Formen und hoher Präzision gerecht wird.

#### 3.1.1 Zugfestigkeit bei Raumtemperatur

einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung bei Raumtemperatur ist der Hauptindikator für ihre Eigenschaften und spiegelt die Bruchfestigkeit der Legierung unter Zugbelastung wider. Dank dieser Eigenschaft hält sie hohen Belastungen in Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt, militärischen Projektilkernen und Ausgleichsblöcken in der Elektronikindustrie stand und gewährleistet die strukturelle Stabilität und Zuverlässigkeit der Komponenten. Die hervorragende Zugfestigkeit beruht auf der hohen Härte der Wolframpartikel und der verstärkenden Wirkung der Nickel-Kupfer-Bindungsphase. Wolfram als Hauptbestandteil sorgt für eine starke Skelettstruktur, und seine kubisch-raumzentrierte Kristallstruktur verleiht der Legierung eine extrem hohe Härte und Verformungsbeständigkeit. Die Nickel-Kupfer-Bindungsphase bildet durch Flüssigphasensintern eine kontinuierliche Matrix, die die Lücken zwischen den Wolframpartikeln füllt, die Bindungskraft zwischen den Partikeln erhöht und es der Legierung ermöglicht, Spannungen während der Dehnung wirksam zu verteilen und lokale Brüche zu vermeiden.

Die Zugfestigkeit wird gemeinsam von der Legierungszusammensetzung und den Prozessbedingungen beeinflusst. Legierungen mit einem höheren Wolframgehalt (z. B. 95 % Wolfram) haben im Allgemeinen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eine höhere Zugfestigkeit, da die Dichte und Härte der Wolframpartikel die Hauptstütze bilden. Das Verhältnis von Nickel und Kupfer hat ebenfalls einen wichtigen Einfluss auf die Festigkeit. Nickel verbessert die Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Bindephase, während Kupfer die Wärmeleitfähigkeit und die nichtmagnetischen Eigenschaften verbessert. Ein geeignetes Nickel-Kupfer-Verhältnis (z. B. 7:3 oder 3,5:1,5) gewährleistet eine gute Bindung zwischen der Bindephase und den Wolframpartikeln, wodurch eine gleichmäßige Mikrostruktur gebildet und Spannungskonzentrationen vermieden werden. Der Flüssigphasensinterprozess bildet bei hoher Temperatur eine flüssige Matrix aus Nickel und Kupfer, benetzt die Wolframpartikel, fördert die Bildung von Sinterhälsen und verbessert zusätzlich die Bindungskraft zwischen den Partikeln.

In der Praxis ermöglicht die Zugfestigkeit von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen, hochfrequenten Vibrationen in Luft- und Raumfahrtkomponenten oder Hochgeschwindigkeitseinschlägen in militärischen Projektilkernen standzuhalten. Beispielsweise muss die Legierung in Flugzeug-Querruder-Gegengewichten dynamischen Belastungen während des Fluges standhalten, und ihre hohe Zugfestigkeit stellt sicher, dass sich die Komponenten nicht verformen oder brechen. In Strahlentherapiegeräten im medizinischen Bereich muss der Kollimator mechanischen Belastungen und Ermüdungserscheinungen durch Langzeitgebrauch standhalten, und die hohe Zugfestigkeit gewährleistet seine Präzision und Langlebigkeit. Prozessoptimierung ist der Schlüssel zur Verbesserung der Zugfestigkeit, beispielsweise durch die Kontrolle der Sintertemperatur und Haltezeit, die Vermeidung übermäßigen Wolframpartikelwachstums oder der Entmischung von Nickel-Kupfer-Phasen sowie die Gewährleistung einer gleichmäßigen Mikrostruktur.

### 3.1.2 Dehnung

Die Dehnung ist ein wichtiger Indikator zur Messung der Plastizität und Zähigkeit von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen, da sie das Ausmaß angibt, in dem die Legierung plastisch verformt werden kann, bevor ein Zugbruch auftritt. Verglichen mit der Sprödigkeit von reinem Wolfram ist die Dehnung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen deutlich verbessert. Dadurch neigen sie weniger zu Sprödbrüchen bei Stößen oder Vibrationen und eignen sich für Anwendungsszenarien, die ein gewisses Maß an Zähigkeit erfordern, wie etwa Gegengewichte für chirurgische Roboter oder Vibrationsdämpfungskomponenten für elektronische Geräte. Die hervorragende Dehnungsleistung ist hauptsächlich auf die Zähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase zurückzuführen. Nickel bietet mit seiner kubisch-flächenzentrierten Kristallstruktur eine gute plastische Verformbarkeit, während Kupfer die Duktilität der Bindungsphase weiter verbessert, sodass die Legierung bei Belastung Energie durch plastische Verformung absorbieren und plötzliche Brüche vermeiden kann. Diese Eigenschaft verleiht der Legierung eine gute Ermüdungsbeständigkeit in dynamischen Umgebungen.

Die Dehnung wird durch Legierungszusammensetzung, Mikrostruktur und Herstellungsverfahren beeinflusst. Ein erhöhter Nickelgehalt erhöht in der Regel die Dehnung, da Nickel eine bessere Zähigkeit als Wolfram aufweist, Spannungen effektiver abbauen und den Verformungsprozess verlängern kann. Ein zu hoher Nickelgehalt kann jedoch die Gesamtfestigkeit verringern, sodass ein Gleichgewicht zwischen Zähigkeit und Festigkeit gefunden werden muss. Die Zugabe von Kupfer verbessert die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dehnung zusätzlich, da dessen hohe Duktilität die Härte der Bindephase verringert und die Legierung dadurch anfälliger für plastisches Fließen während der Dehnung wird. Das Flüssigphasensinterverfahren bildet bei hohen Temperaturen eine gleichmäßige Nickel-Kupfer-Matrix, die die Lücken zwischen den Wolframpartikeln füllt und so eine durchgehende Netzwerkstruktur bildet, die Spannungsübertragung und plastische Verformung erleichtert. Das heißisostatische Pressverfahren verbessert die Zähigkeit und Dehnung der Legierung zusätzlich, indem es Mikroporen beseitigt und die Grenzflächenbindung optimiert. Wärmebehandlungsverfahren wie Glühen können das plastische Verhalten der Legierung ebenfalls verbessern, indem sie Eigenspannungen beseitigen und die Korngrenzenstruktur optimieren.

Im Anwendungsszenario wirkt sich die Dehnung direkt auf die Anwendbarkeit der Legierung aus. In der Luft- und Raumfahrt müssen Gegengewichte hochfrequenten Vibrationen und Stößen standhalten. Eine höhere Dehnung stellt sicher, dass die Komponenten unter dynamischen Belastungen nicht spröde brechen und verlängert ihre Lebensdauer. In der Elektronikindustrie muss der Ausgleichsblock der Lithografieplattform geringen Vibrationen standhalten, und eine moderate Dehnung gewährleistet die Stabilität der Komponenten im Langzeiteinsatz. Obwohl Abschirmteile im medizinischen Bereich hauptsächlich auf eine hohe Dichte angewiesen sind, verringert eine entsprechende Dehnung die Rissgefahr bei Verarbeitung und Montage. Die Prozessoptimierung muss sich auf Spurenelemente und die Kontrolle von Verunreinigungen konzentrieren, beispielsweise die Vermeidung von Verunreinigungen wie Sauerstoff oder Kohlenstoff, die spröde Phasen bilden und die Dehnung reduzieren. Oberflächenbehandlungen (wie Polieren oder Beschichten) können ebenfalls Oberflächendefekte reduzieren und die plastische Verformbarkeit verbessern. Durch die genaue Kontrolle des Nickel-Kupfer-Verhältnisses und die Einführung fortschrittlicher Fertigungstechnologien (wie etwa additive Fertigung) kann die Dehnung in Zukunft weiter optimiert werden, um die Leistung der Legierung in Szenarien mit hohen Zähigkeitsanforderungen zu verbessern.

### 3.1.3 Hohe Temperaturbeständigkeit

von Wolfram -Nickel-Kupfer-Legierungen ist in Hochtemperaturumgebungen wichtig, da sie die Festigkeitserhaltung und strukturelle Stabilität der Legierung unter Hochtemperaturbelastung widerspiegelt. Dank dieser Eigenschaft eignet sie sich hervorragend für Bereiche wie die Luft- und Raumfahrt, die Rüstungsindustrie und die Elektronikindustrie, in denen hohe Temperaturen standhalten müssen, wie z. B. Raketenkomponenten, Gegengewichte von Turboladern oder Ausgleichsblöcke in Hochtemperatur-Elektronikgeräten. Die hervorragende Hochtemperaturbeständigkeit ist auf den synergetischen Effekt des hohen Schmelzpunkts von Wolfram und der thermischen Stabilität der Nickel-Kupfer-Bindephase zurückzuführen. Wolfram als Hauptbestandteil hat einen extrem hohen Schmelzpunkt und kann die Integrität der Kristallstruktur bei hohen Temperaturen bewahren sowie thermischer Verformung und Erweichung widerstehen. Die Nickel-Kupfer-Bindephase verbessert die mechanischen Eigenschaften und die Oxidationsbeständigkeit der Legierung bei hohen Temperaturen zusätzlich, indem sie eine stabile feste Lösung bildet, wodurch die Leistung in einer Hochtemperaturumgebung lange erhalten bleibt.

Die Hochtemperaturbeständigkeit wird maßgeblich von der Legierungszusammensetzung und der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mikrostruktur beeinflusst. Legierungen mit einem höheren Wolframanteil weisen eine höhere Beständigkeit gegen Erweichung bei hohen Temperaturen auf, da die kubisch-raumzentrierte Kristallstruktur von Wolfram eine extrem hohe thermische Stabilität aufweist und Korngrenzengleiten oder Versetzungen durch hohe Temperaturen standhält. Nickel bietet Oxidationsschutz in der Bindephase, und die auf seiner Oberfläche gebildete Oxidschicht verhindert wirksam Sauerstofferosion und erhält die strukturelle Integrität der Legierung. Obwohl die Zugabe von Kupfer den Schmelzpunkt der Bindephase senkt, trägt die hohe Wärmeleitfähigkeit zu einer schnellen Wärmeableitung bei und reduziert Leistungseinbußen durch lokale Überhitzung. Der Flüssigphasensinterprozess bildet bei hohen Temperaturen eine gleichmäßige Mikrostruktur, und die Wolframpartikel werden durch den Sinterhals eng mit der Nickel-Kupfer-Bindephase verbunden, was die Festigkeit der Grenzflächenbindung bei hohen Temperaturen verbessert. Das heißisostatische Pressverfahren eliminiert Mikroporen zusätzlich und verringert so die Wahrscheinlichkeit eines Versagens der Legierung durch Porenausdehnung bei hohen Temperaturen. Wärmebehandlungsverfahren wie Glühen verbessern die mechanische Stabilität bei hohen Temperaturen zusätzlich, indem sie Eigenspannungen eliminieren und die Korngrenzenstruktur optimieren. In der Praxis macht die hohe Temperaturbeständigkeit Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen zur idealen Wahl für Hochtemperaturumgebungen. In der Luft- und Raumfahrt müssen beispielsweise Turbolader oder Raketengegengewichte der durch heiße Gase oder Reibung erzeugten Hitze standhalten.

Die Hochtemperaturbeständigkeit der Legierung gewährleistet, dass die Teile auch unter extremen Bedingungen ihre Form und Festigkeit behalten. In der Elektronikindustrie erfordern hochtemperaturbeständige elektronische Geräte (wie z. B. Wärmemanagementkomponenten von Lithografiegeräten) Materialien, die auch bei hohen Temperaturen formstabil bleiben. Die geringe Wärmeausdehnung der Legierung in Kombination mit der hohen Temperaturbeständigkeit erfüllt diese Anforderung. Prozessoptimierung ist entscheidend für die Verbesserung der Hochtemperaturbeständigkeit. Beispielsweise durch die Kontrolle der Sintertemperatur und -atmosphäre, die Vermeidung von Oxideinschlüssen oder übermäßigem Kornwachstum sowie die Erhaltung der Stabilität der Mikrostruktur. Die Zugabe von Spurenelementen (wie Molybdän) kann die Hochtemperaturfestigkeit weiter verbessern, übermäßige Mengen sollten jedoch vermieden werden, um eine Versprödung der Grenzflächen zu verhindern. Die Qualitätskontrolle überprüft die Leistungsstabilität der Legierung durch Hochtemperatur-Zugversuche und Temperaturwechseltests, um ihre Zuverlässigkeit in Hochtemperaturumgebungen sicherzustellen.

### 3.1.4 Schlagzähigkeit

Schlagzähigkeit ist die Fähigkeit einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung, bei plötzlichen Stößen oder dynamischen Belastungen nicht zu brechen, was ihre Robustheit und Zuverlässigkeit in Umgebungen mit hoher Beanspruchung widerspiegelt. Diese Eigenschaft ist besonders wichtig bei Anwendungen wie Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt, panzerbrechenden Kernen im Militärbereich und Kollimatoren für medizinische Geräte, um sicherzustellen, dass Komponenten bei Vibrationen, Stößen oder vorübergehenden Belastungen keine spröden Brüche erleiden. Verglichen mit der Sprödigkeit von reinem Wolfram ist die Schlagzähigkeit einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung deutlich verbessert,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hauptsächlich aufgrund des plastischen Effekts der Nickel-Kupfer-Bindungsphase. Die Zähigkeit von Nickel ermöglicht es, bei einem Aufprall Energie zu absorbieren und Spannungen durch plastische Verformung abzuleiten, während die hohe Duktilität von Kupfer die Rissbeständigkeit der Bindephase weiter verbessert, wodurch die Legierung bei Stößen ein gutes, zähes Bruchverhalten aufweist.

Die Schlagzähigkeit wird durch Legierungszusammensetzung, Mikrostruktur und Herstellungsverfahren beeinflusst. Wolframpartikel sorgen für hohe Härte und Festigkeit und bilden das stabile Gerüst der Legierung. Ihre Sprödigkeit muss jedoch durch die Nickel-Kupfer-Bindungsphase ausgeglichen werden. Die Nickel-Kupfer-Phase bildet eine geschlossene Matrix, die die Wolframpartikel umschließt und die Schlagenergie durch Grenzflächenbindung effektiv überträgt und verteilt. Ein höherer Nickelgehalt verbessert in der Regel die Schlagzähigkeit, da die kubisch-flächenzentrierte Struktur von Nickel eine hervorragende plastische Verformbarkeit aufweist und beim Aufprall Vertiefungen bilden kann, die Energie absorbieren. Die Zugabe von Kupfer verbessert die Zähigkeit zusätzlich, während seine Duktilität die Härte der Bindephase verringert. Dadurch neigt die Legierung beim Aufprall eher zum plastischen Fließen als zum Sprödbbruch. Das Flüssigphasenintervallverfahren erhöht die Bindungskraft zwischen den Partikeln und verhindert die Grenzflächenablösung beim Aufprall durch die Bildung gleichmäßiger Sinterhalse und einer dichten Mikrostruktur (Porosität < 1 %). Das heißisostatische Pressverfahren verbessert die Schlagzähigkeit zusätzlich und verringert durch die Verdichtung der Struktur die Entstehungsquelle für Mikrorisse.

Im Anwendungsszenario bestimmt die Schlagzähigkeit direkt die Zuverlässigkeit und Haltbarkeit der Legierung. In der Luft- und Raumfahrt müssen Gegengewichte von Flugzeugen oder Hubschraubern Vibrationen und Stößen standhalten, die durch Start, Landung oder Turbulenzen verursacht werden. Eine hohe Schlagzähigkeit stellt sicher, dass die Komponenten nicht durch vorübergehende Belastungen versagen. In militärischen panzerbrechenden Projektilkernen müssen Legierungen Hochgeschwindigkeitseinschlägen (Anfangsgeschwindigkeit 1500–1800 m/s) standhalten, und eine gute Schlagzähigkeit gewährleistet, dass der Kern beim Durchdringen der Panzerung seine Integrität behält. In medizinischen Geräten können Kollimatoren oder Komponenten chirurgischer Roboter versehentlich einschlagen, und die Schlagzähigkeit stellt sicher, dass ihre Genauigkeit und Funktion nicht beeinträchtigt werden. Die Prozessoptimierung muss sich auf die Kontrolle von Spurenverunreinigungen (wie Kohlenstoff oder Sauerstoff) konzentrieren, um die Bildung spröder Phasen zu vermeiden, die die Zähigkeit mindern. Oberflächenbehandlungen (wie Polieren oder Beschichten) können Oberflächendefekte reduzieren und die Schlagzähigkeit weiter verbessern.

### 3.2 Thermische und elektrische Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

Die thermischen und elektrischen Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen sind wichtige Voraussetzungen für ihre Anwendung in Hightech-Bereichen, insbesondere in Bereichen, die ein effizientes Wärmemanagement und elektromagnetische Verträglichkeit erfordern, wie z. B. Ausgleichsblöcke für Lithografiemaschinen in der Elektronikindustrie, Abschirmteile für medizinische CT/MRT-Geräte und Hochtemperaturkomponenten in der Luft- und Raumfahrt. Zu den thermischen Eigenschaften zählen vor allem die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmeausdehnung, die die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeableitungskapazität und Dimensionsstabilität der Legierung in Hochtemperaturumgebungen bestimmen. Die elektrischen Eigenschaften spiegeln sich vor allem in der elektrischen Leitfähigkeit und der Nichtmagnetisierung wider, wodurch die Legierung in elektromagnetisch empfindlichen Umgebungen keine Störungen verursacht. Diese Eigenschaften beruhen auf der hohen thermischen Stabilität von Wolfram und der hervorragenden thermischen und elektrischen Leitfähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase und werden durch optimierte Pulvermetallurgieprozesse synergetisch erreicht. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen zeichnen sich durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit aus, die Wärme schnell ableitet und lokale Überhitzung verhindert. Dies ist auf die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer und die gleichmäßige Verteilung der Nickel-Kupfer-Mischkristalle zurückzuführen. Die hohe thermische Stabilität der Wolframpartikel gewährleistet zudem die strukturelle Integrität der Legierung bei hohen Temperaturen. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient ermöglicht der Legierung, ihre Dimensionsstabilität bei Temperaturschwankungen beizubehalten und Verformungen durch thermische Spannungen zu vermeiden. Sie eignet sich besonders für Anwendungen mit extrem hohen Präzisionsanforderungen, wie z. B. Lithografieplattformen oder medizinische Geräte. Im Produktionsprozess gewährleisten Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen die Kompaktheit der Mikrostruktur und reduzieren den Korngrenzenwiderstand bei der Wärmeleitung. Die Wärmebehandlung verbessert die Wärmeleitfähigkeit zusätzlich, indem sie die Korngrenzenstruktur optimiert und gleichzeitig die geringen Wärmeausdehnungseigenschaften beibehält.

In Bezug auf die elektrischen Eigenschaften ist die nichtmagnetische Natur der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ihr größter Vorteil. Dies ist auf die paramagnetischen Eigenschaften von Nickel und Kupfer zurückzuführen, wodurch elektromagnetische Störungen vermieden werden und eine gute Leistung in elektromagnetisch sensiblen Umgebungen wie MRT-Geräten, Lithographiemaschinen und Radarsystemen ermöglicht wird. Obwohl die elektrische Leitfähigkeit der Legierung geringer ist als die von reinem Kupfer, reicht sie aus, um die Anforderungen der meisten elektronischen Anwendungen zu erfüllen, insbesondere in Szenarien, in denen hohe Dichte und elektromagnetische Verträglichkeit berücksichtigt werden müssen. Die Leitfähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase verleiht der Legierung stabile elektrische Eigenschaften, während die geringe Leitfähigkeit der Wolframpartikel durch die Optimierung der Mikrostruktur ausgeglichen wird. Die Prozesskontrolle muss Oxideinschlüsse oder -seigerungen vermeiden, die die Leitfähigkeit oder den Nichtmagnetismus beeinflussen. Oberflächenbeschichtungen (wie PVD TiN) können die Legierung zusätzlich vor Umweltkorrosion schützen und die Stabilität der elektrischen Eigenschaften aufrechterhalten.

### 3.2.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist der wichtigste Indikator für deren Fähigkeit, Wärme schnell zu leiten und abzuleiten. Diese Eigenschaft verschafft ihr einen erheblichen Vorteil bei Anwendungen, die ein effizientes Wärmemanagement erfordern, wie z. B. Ausgleichsblöcke für Lithographiemaschinen in der Elektronikindustrie, Strahlenschutz in medizinischen Geräten und Hochtemperaturkomponenten in der Luft- und Raumfahrt. Die hervorragende Wärmeleitfähigkeit beruht hauptsächlich auf dem synergetischen Effekt der hohen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer und der Nickel-Kupfer-Bindungsphase. Kupfer ist ein Metall mit hoher Wärmeleitfähigkeit und kann Wärme schnell

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

von der Wärmequelle an andere Bereiche ableiten, um lokale Überhitzung zu verhindern, während die Zugabe von Nickel eine stabile feste Lösung bildet und die Wärmeleitfähigkeit der Bindephase verbessert. Obwohl Wolfram eine geringere Wärmeleitfähigkeit als Kupfer hat, gewährleistet seine hohe Wärmestabilität, dass die Legierung bei hohen Temperaturen ihre strukturelle Integrität behält und Verformungen oder Versagen durch thermische Spannungen vermieden werden.

Die Wärmeleitfähigkeit wird maßgeblich von der Legierungszusammensetzung und der Mikrostruktur beeinflusst. Das Verhältnis der Nickel-Kupfer-Bindungsphase bestimmt direkt die Wärmeleitfähigkeit. Legierungen mit höherem Kupfergehalt weisen im Allgemeinen eine bessere Wärmeleitfähigkeit auf, da diese die von Wolfram und Nickel deutlich übersteigt. Ein zu hoher Kupfergehalt kann jedoch die Gesamtfestigkeit der Legierung verringern, daher muss ein Gleichgewicht zwischen Wärmeleitfähigkeit und mechanischen Eigenschaften gefunden werden. Das Flüssigphasensinterverfahren bildet bei hohen Temperaturen eine gleichmäßige Nickel-Kupfer-Matrix, füllt die Lücken zwischen den Wolframpartikeln, verringert den Widerstand der Korngrenzen und Poren gegen Wärmeleitung und verbessert so die Wärmeleitfähigkeit. Das heißisostatische Pressverfahren optimiert die Dichte der Mikrostruktur zusätzlich, indem es Mikroporen beseitigt und so die Wärmeübertragung verbessert. Wärmebehandlungsverfahren wie Glühen können die Wärmeleitfähigkeit ebenfalls effektiv verbessern, indem sie Kristalldefekte reparieren und die Korngrenzenstruktur optimieren. Dadurch wird die Leistungsstabilität der Legierung bei hohen Temperaturen sichergestellt.

In der Praxis beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit die Leistung von Legierungen im Hightech-Bereich direkt. Beispielsweise muss die Legierung in der Lithografieplattform die von Laser oder Motor erzeugte Wärme schnell ableiten, um eine Präzision im Subnanometerbereich zu gewährleisten. Eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit gewährleistet die thermische Stabilität der Plattform. In medizinischen CT-Geräten erzeugen Abschirmteile unter energiereicher Strahlung Wärme. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit trägt zur schnellen Wärmeableitung bei, um Überhitzung oder Leistungseinbußen des Geräts zu vermeiden. In der Luft- und Raumfahrt werden Raketen- oder Turbinenkomponenten in Hochtemperaturgasumgebungen betrieben. Die Wärmeleitfähigkeit der Legierung gewährleistet das Wärmemanagement der Komponenten und verlängert ihre Lebensdauer. Bei der Prozessoptimierung müssen die Reinheit der Rohstoffe und die Sinterparameter berücksichtigt werden, um Oxideinschlüsse oder -seigerungen zu vermeiden, die die Wärmeleitfähigkeit verringern.

### 3.2.2 Leitfähigkeit

einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung sind ein wichtiger Indikator für ihre Fähigkeit, Strom zu leiten. Obwohl ihre elektrische Leitfähigkeit geringer ist als die von reinem Kupfer, reicht sie für die meisten elektronischen und medizinischen Anwendungen aus, insbesondere in Szenarien, in denen hohe Dichte und elektromagnetische Verträglichkeit berücksichtigt werden müssen. Die moderate elektrische Leitfähigkeit ergibt sich aus dem Gleichgewicht zwischen der Leitfähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase und der relativ geringen Leitfähigkeit der Wolframpartikel. Kupfer, ein Metall mit hoher Leitfähigkeit, stellt den Hauptstromleitungspfad für die Legierung dar, während durch die Zugabe von Nickel eine stabile Ni-Cu-Feststofflösung entsteht, wodurch eine moderate elektrische Leitfähigkeit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aufrechterhalten wird. Obwohl die hohen Widerstandseigenschaften von Wolfram die Gesamtleitfähigkeit verringern, bietet es aufgrund seiner hohen Dichte und Nichtmagnetizität einzigartige Vorteile in elektromagnetisch empfindlichen Umgebungen, da magnetische Interferenzen vollständig vermieden werden.

Die elektrische Leitfähigkeit wird durch Legierungszusammensetzung, Mikrostruktur und Herstellungsverfahren beeinflusst. Legierungen mit höherem Kupfergehalt weisen im Allgemeinen eine höhere elektrische Leitfähigkeit auf, da die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer deutlich höher ist als die von Nickel und Wolfram. Ein zu hoher Kupfergehalt kann jedoch zu einer Verringerung der Festigkeit führen. Ein Gleichgewicht zwischen elektrischer Leitfähigkeit und mechanischen Eigenschaften muss daher durch ein optimiertes Nickel-Kupfer-Verhältnis (z. B. 7:3 oder 3,5:1,5) erreicht werden. Das Flüssigphasensinterverfahren reduziert den Korngrenzenwiderstand und fördert durch die Bildung einer durchgehenden Nickel-Kupfer-Matrix einen gleichmäßigen Stromfluss. Das heißisostatische Pressverfahren verbessert die Dichte der Mikrostruktur zusätzlich und eliminiert die negativen Auswirkungen von Poren und Einschlüssen auf die Leitfähigkeit. Der Umgang mit Verunreinigungen ist entscheidend. Beispielsweise können Verunreinigungen wie Sauerstoff oder Kohlenstoff nichtleitende Oxide oder Carbide bilden und so die Leitfähigkeit verringern. Daher sind für das Sintern hochreine Rohstoffe (Wolfram > 99,9 %) und eine hochreine Argonatmosphäre erforderlich. Aufgrund ihrer moderaten Leitfähigkeit und ihres Nichtmagnetismus eignet sich die Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung hervorragend für Anwendungen in der Elektronikindustrie und im medizinischen Bereich. Beispielsweise müssen die Abschirmteile der Legierung in MRT-Geräten magnetische Feldstörungen vermeiden, und die moderate Leitfähigkeit in Kombination mit Nichtmagnetismus gewährleistet die hohe Empfindlichkeit und Präzision der Geräte. In Lithografiegeräten unterstützt die Leitfähigkeit des Ausgleichsblocks dessen normalen Betrieb in der elektromagnetischen Umgebung und verhindert statische Aufladung oder Störungen. Die Prozessoptimierung muss sich auf die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur konzentrieren, um Entmischungen oder Defekte zu vermeiden, die die Leitfähigkeit beeinträchtigen.

### 3.2.3 Wärmeausdehnungskoeffizient

Wolfram -Nickel-Kupfer-Legierungen zeichnen sich durch ein wesentliches thermisches Verhalten aus, das die Dimensionsstabilität der Legierung bei Temperaturschwankungen widerspiegelt. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient verschafft ihr einen entscheidenden Vorteil bei Anwendungen, die hohe Präzision und thermische Stabilität erfordern, wie beispielsweise Lithografieplattformen, medizinische Kollimatoren und Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt. Die geringe Wärmeausdehnung beruht hauptsächlich auf den inhärent geringen Wärmeausdehnungseigenschaften von Wolfram in Kombination mit der moderaten Duktilität der Nickel-Kupfer-Bindungsphase. Dadurch behält die Legierung ihre Form und Dimensionsstabilität bei Temperaturschwankungen und vermeidet Verformungen oder Risse durch thermische Spannungen.

Der Wärmeausdehnungskoeffizient wird sowohl von der Legierungszusammensetzung als auch von der Mikrostruktur beeinflusst. Der hohe Schmelzpunkt und die kubisch-raumzentrierte Struktur von Wolfram

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

führen zu einer extrem niedrigen Wärmeausdehnungsrate, die die gesamten Wärmeausdehnungseigenschaften der Legierung dominiert. Nickel und Kupfer haben höhere Wärmeausdehnungskoeffizienten als Wolfram, aber durch eine geeignete Gestaltung des Verhältnisses wird der Beitrag der Bindungsphase zur Wärmeausdehnung minimiert. Der Flüssigphasensinterprozess bildet eine gleichmäßige Mikrostruktur, und die Wolframpartikel sind durch den Sinterhals fest mit der Nickel-Kupfer-Matrix verbunden, wodurch das Gleiten an den Korngrenzen oder die thermische Spannungskonzentration verringert werden. Das heißostatische Pressverfahren verbessert die Dichte und thermische Stabilität der Struktur weiter, indem es Mikroporosität beseitigt. Wärmebehandlungsverfahren wie Glühen verbessern die Dimensionsstabilität der Legierung während thermischer Zyklen, indem sie die Korngrenzenstruktur optimieren und Eigenspannungen eliminieren, wodurch Mikrorisse durch Temperaturschwankungen vermieden werden.

In der Praxis macht der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen zur idealen Wahl für hochpräzise Geräte. Beispielsweise muss die Plattform in einer Fotolithografiemaschine während der Laser-Heiz- und Kühlzyklen eine Präzision im Subnanometerbereich aufrechterhalten. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die Stabilität der Plattform und verhindert thermische Verformungen, die die Mustergravur beeinträchtigen. In der Luft- und Raumfahrt arbeiten Gegengewichte in Hochtemperaturgasen oder Niedertemperaturumgebungen, und der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die Stabilität des Schwerpunkts. Der Kollimator in medizinischen Geräten muss seine Form unter der durch Strahlung erzeugten Hitze beibehalten, und die geringen Wärmeausdehnungseigenschaften gewährleisten seine Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Durch Prozessoptimierung muss verhindert werden, dass sich Verunreinigungen (wie Sauerstoff oder Kohlenstoff) in Phasen mit hoher Ausdehnung bilden, die die Gesamtleistung beeinträchtigen.

### 3.2.4 Wärmeableitungsleistung

Wolfram -Nickel-Kupfer-Legierungen zeichnen sich durch ein umfassendes Wärmeverhalten aus. Sie vereinen die Vorteile einer hohen Wärmeleitfähigkeit mit einem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten, wodurch Wärme schnell abgeleitet und die Dimensionsstabilität erhalten wird. Diese Eigenschaften prädestinieren sie für Anwendungen, die ein effizientes Wärmemanagement erfordern, wie beispielsweise Wärmemanagementkomponenten von Fotolithografiemaschinen in der Elektronikindustrie, Strahlenschutz in medizinischen Geräten und Hochtemperaturkomponenten in der Luft- und Raumfahrt. Die exzellente Wärmeableitung beruht auf der hohen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer und der gleichmäßigen Verteilung der Nickel-Kupfer-Matrix. Diese leitet Wärme schnell von der Wärmequelle nach außen ab und verhindert so lokale Überhitzung. Gleichzeitig gewährleistet die geringe Wärmeausdehnung, dass sich die Komponenten bei thermischen Zyklen nicht verformen oder versagen.

Die Wärmeableitungsleistung wird durch Legierungszusammensetzung, Mikrostruktur und Herstellungsverfahren beeinflusst. Ein erhöhter Kupferanteil verbessert die Wärmeableitungseffizienz deutlich, da Kupfer eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit als Wolfram und Nickel aufweist und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärme schnell ableiten kann. Durch die Zugabe von Nickel entsteht eine stabile Ni-Cu-Mischkristalllösung, die die Wärmeleitfähigkeit der Bindungsphase verbessert und antioxidativen Schutz bietet, um eine Verringerung der Wärmeableitungsleistung durch Hochtemperaturoxidation zu verhindern. Die hohe thermische Stabilität der Wolframpartikel gewährleistet die strukturelle Integrität der Legierung bei hohen Temperaturen und verhindert thermische Erweichung oder Leistungseinbußen. Das Flüssigphasensinterverfahren reduziert die Hindernisse für die Wärmeleitung durch Korngrenzen und Poren durch die Bildung einer durchgehenden Nickel-Kupfer-Matrix. Das heißisostatische Pressverfahren verbessert die Dichte der Mikrostruktur zusätzlich und eliminiert den Widerstand der Mikroporen bei der Wärmeleitung. Oberflächenbehandlungen (z. B. eine hochwärmeleitende Beschichtung oder Polieren auf  $Ra < 0,4 \mu m$ ) können die Wärmeableitungseffizienz der Oberfläche verbessern und die Wärmeabgabe an die Umgebung beschleunigen.

In der Praxis bestimmt die Wärmeableitungsleistung direkt die Anwendbarkeit der Legierung im Hightech-Bereich. In Fotolithografiegeräten muss der Ausgleichsblock die vom Laser oder Motor erzeugte Wärme schnell ableiten, wobei eine hervorragende Wärmeableitungsleistung die thermische Stabilität und Genauigkeit der Plattform gewährleistet. In medizinischen CT-Geräten erzeugen Abschirmteile unter energiereicher Strahlung Wärme. Eine effiziente Wärmeableitung verhindert eine Überhitzung des Geräts und verlängert dessen Lebensdauer. In der Luft- und Raumfahrt arbeiten Turbinen- oder Raketenkomponenten in einer Hochtemperaturgasumgebung, wobei die Wärmeableitungsleistung die Zuverlässigkeit und Langlebigkeit der Komponenten gewährleistet. Bei der Prozessoptimierung müssen die Reinheit der Rohstoffe und die Sinterparameter berücksichtigt werden, um Oxideinschlüsse oder -seigerungen zu vermeiden, die die Wärmeableitungseffizienz beeinträchtigen.

### 3.3 Chemische Stabilität der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen finden aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften, ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften sowie ihrer hervorragenden thermischen und elektrischen Eigenschaften breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, Medizin, Elektronik und im Militär. Die Legierung wird pulvermetallurgisch hergestellt. Wolfram ist der Hauptbestandteil, ergänzt durch Nickel und Kupfer als Bindephasen. Dadurch entsteht eine dichte Mikrostruktur und eine ausgezeichnete chemische Stabilität. Ihre chemische Stabilität spiegelt sich vor allem in der Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit wider, wodurch die Legierung auch in rauen Umgebungen wie Feuchtigkeit, Säure oder hohen Temperaturen lange ihre Leistung behält. Diese Stabilität ist auf die chemische Inertheit von Wolfram und die schützende Wirkung der Nickel-Kupfer-Bindungsphase zurückzuführen und erfüllt die Anforderungen hochzuverlässiger Anwendungen.

#### 3.3.1 Korrosionsbeständigkeit

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen ist ein wichtiger Ausdruck ihrer Beständigkeit gegenüber chemischer Erosion in korrosiven Umgebungen wie Feuchtigkeit, Säure oder Salznebel. Diese Eigenschaft ermöglicht eine gute Leistung in Anwendungsbereichen, die einen langfristig stabilen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Betrieb erfordern, wie z. B. in der Medizintechnik, im Schiffsbau und in der Elektronikindustrie, beispielsweise bei Abschirmungen für medizinische CTs, Gegengewichten von Schiffen oder Gehäusen für elektronische Geräte. Die hervorragende Korrosionsbeständigkeit ist hauptsächlich auf den synergistischen Effekt der chemischen Inertheit von Wolfram und der Korrosionsbeständigkeit von Nickel zurückzuführen. Als Hauptbestandteil weist Wolfram eine extrem hohe chemische Stabilität auf und reagiert in den meisten sauren oder alkalischen Umgebungen nur bedingt, was die Grundlage für die Korrosionsbeständigkeit der Legierung bildet. Nickel bildet in der Bindungsphase eine stabile Schutzschicht, die der Erosion durch externe Chemikalien wirksam widersteht und die Lebensdauer der Legierung verlängern kann.

Die Korrosionsbeständigkeit wird durch Legierungszusammensetzung, Mikrostruktur und Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst. Nickel spielt eine führende Rolle in der Nickel-Kupfer-Bindungsphase. Seine kubisch-flächenzentrierte Struktur und seine antioxidativen Eigenschaften ermöglichen es ihm, in feuchter oder saurer Umgebung eine dichte Oxidschutzschicht zu bilden, die das weitere Eindringen korrosiver Medien verhindert. Obwohl die Zugabe von Kupfer die Wärmeleitfähigkeit und den Antimagnetismus verbessert, ist seine Korrosionsbeständigkeit der von Nickel etwas unterlegen. In manchen sauren Umgebungen (wie Salpetersäure) kann leichte Korrosion auftreten. Daher ist es notwendig, die Gesamtkorrosionsbeständigkeit durch ein angemessenes Nickel-Kupfer-Verhältnis (z. B. 7:3 oder 3,5:1,5) zu optimieren. Das Flüssigphasenintervallverfahren bildet bei hohen Temperaturen eine gleichmäßige Nickel-Kupfer-Matrix, füllt die Lücken zwischen den Wolframpartikeln, reduziert Mikroporen und Korngrenzen und verkürzt den Eindringweg korrosiver Medien. Das heißisostatische Pressverfahren verbessert die Dichte der Mikrostruktur zusätzlich, glättet die Legierungsoberfläche und verringert den Korrosionsansatzpunkt. Oberflächenbehandlungsverfahren wie Polieren oder chemische Passivierung können die Korrosionsbeständigkeit weiter verbessern und eine dichtere Schutzschicht bilden, die sich besonders für den Langzeiteinsatz medizinischer Geräte in einer sterilen Umgebung eignet.

In der Praxis bestimmt die Korrosionsbeständigkeit direkt die Zuverlässigkeit und Haltbarkeit der Legierung. Im medizinischen Bereich müssen die Abschirmteile von CT- oder MRT-Geräten über längere Zeit Desinfektionsmitteln oder feuchten Umgebungen ausgesetzt sein. Eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit gewährleistet die Oberflächenintegrität und Funktionsstabilität der Teile. Im Schiffsbau können Schiffsgegengewichte Seewasser oder Salznebel ausgesetzt sein. Die Korrosionsbeständigkeit der Legierung verhindert Materialzerersetzung und verlängert die Lebensdauer. In der Elektronikindustrie müssen Gehäuse oder Ausgleichsgewichte den Chemikalien in der Produktionsumgebung standhalten. Korrosionsbeständigkeit gewährleistet den langfristigen Betrieb der Geräte. Die Prozessoptimierung erfordert eine strenge Kontrolle der Rohstoffreinheit, um die Bildung leicht korrosiver Phasen durch Verunreinigungen wie Sauerstoff oder Schwefel zu verhindern. Oberflächenbeschichtungen (wie PVD TiN oder DLC) können die Korrosionsbeständigkeit, insbesondere in aggressiven chemischen Umgebungen, weiter verbessern. Die Qualitätskontrolle überprüft die Korrosionsbeständigkeit durch Salzsprühtests und Tauchversuche, um sicherzustellen, dass die Legierung Industriestandards (wie ISO 9227) erfüllt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.3.2 Antioxidative Eigenschaften

der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist ihre chemische Stabilität. Sie gibt an, wie gut die Legierung Oxidationsreaktionen bei hohen Temperaturen oder in oxidierenden Atmosphären standhält. Diese Eigenschaft verschafft ihr erhebliche Vorteile bei Hochtemperaturkomponenten in der Luft- und Raumfahrt, Wärmemanagementkomponenten in der Elektronikindustrie und militärischer Ausrüstung wie Turbinengegengewichten, Kühlkörpern für Fotolithografiemaschinen oder Raketenabwehrschilden. Die hervorragende Oxidationsbeständigkeit ist hauptsächlich auf die Oxidationsbeständigkeit von Nickel und die thermische Stabilität von Wolfram zurückzuführen. Nickel bildet bei hohen Temperaturen eine dichte Oxidschutzschicht, die verhindert, dass Sauerstoff die innere Struktur weiter korrodiert, während der hohe Schmelzpunkt und die chemische Inertheit von Wolfram es ermöglichen, die strukturelle Integrität bei hohen Temperaturen aufrechtzuerhalten und Leistungseinbußen durch Oxidation zu vermeiden. Obwohl Kupfer eine geringere Oxidationsbeständigkeit aufweist, werden dessen negative Auswirkungen unter dem Schutz von Nickel minimiert.

Die Oxidationsbeständigkeit wird maßgeblich von der Legierungszusammensetzung, der Mikrostruktur und den Prozessbedingungen beeinflusst. Nickel spielt eine wichtige antioxidative Rolle in der Nickel-Kupfer-Bindephase. Seine Oxidschicht (NiO) weist bei hohen Temperaturen (<1000 °C) eine niedrige Diffusionsrate auf, wodurch das Eindringen von Sauerstoff wirksam blockiert und die inneren Wolframpartikel sowie die Nickel-Kupfer-Matrix geschützt werden können. Die hohe thermische Stabilität von Wolfram erhöht die Oxidationsbeständigkeit zusätzlich. Selbst bei hohen Temperaturen bleibt seine kubisch-raumzentrierte Struktur stabil und widersteht oxidativer Korrosion. Kupfer kann in oxidierender Atmosphäre Kupferoxid (CuO oder Cu<sub>2</sub>O) bilden. Die schützende Wirkung von Nickel kann jedoch die Kupferoxidation durch ein angemessenes Nickel-Kupfer-Verhältnis (z. B. 7:3) wirksam hemmen. Der Flüssigphasensinterprozess bildet bei hohen Temperaturen eine dichte Mikrostruktur, reduziert Poren und Korngrenzen und verringert so den Weg für das Eindringen von Sauerstoff. Das heißisostatische Pressverfahren verbessert die Strukturichte weiter, indem es Mikroporen beseitigt und die Legierungsoberfläche weniger anfällig für Oxidation macht.

In der Praxis beeinflusst die Oxidationsbeständigkeit die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Legierung in Hochtemperaturumgebungen direkt. In der Luft- und Raumfahrt werden Turbinen- oder Raketenkomponenten in Hochtemperaturgasumgebungen betrieben. Eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit gewährleistet die Oberflächenintegrität von Gegengewichten oder Abschirmteilen und verhindert oxidationsbedingte Verformungen oder Ausfälle. In der Elektronikindustrie müssen die Wärmeableitungskomponenten von Fotolithografiemaschinen der von Lasern oder Motoren erzeugten Hitze standhalten, und die Oxidationsbeständigkeit gewährleistet die Stabilität bei langfristigem Hochtemperaturbetrieb. In militärischer Ausrüstung können Abschirmteile oxidierenden Hochtemperaturatmosphären ausgesetzt sein, und die Oxidationsbeständigkeit der Legierung erhält ihre elektromagnetische Abschirmfunktion. Die Prozessoptimierung muss sich auf die Kontrolle von Verunreinigungen konzentrieren, um zu verhindern, dass Verunreinigungen wie Kohlenstoff oder Schwefel leicht oxidierbare Phasen bilden. Oberflächenbehandlungen (wie chemische Passivierung oder antioxidative Beschichtung) können die Oxidationsbeständigkeit insbesondere in

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zyklischen Hochtemperaturumgebungen weiter verbessern. Die Qualitätskontrolle überprüft die Oxidationsbeständigkeit durch Hochtemperaturoxidationstests und thermogravimetrische Analyse (TGA), um sicherzustellen, dass die Legierung den Standards der Luft- und Raumfahrt- oder Elektronikindustrie entspricht.

### 3.4 CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung Sicherheitsdatenblatt

Das Sicherheitsdatenblatt (MSDS) ist ein wichtiges Dokument, das die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen sowie Hinweise zur sicheren Verwendung beschreibt und Anwendern und Bedienern Hinweise zur sicheren Handhabung und zu Notfallmaßnahmen gibt. Die von der CTIA GROUP LTD hergestellte Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung (W-Ni-Cu) ist eine hochdichte Legierung, die in der Luft- und Raumfahrt, der Medizin, der Elektronik und der Rüstungsindustrie weit verbreitet ist. Sie wird aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften, ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften und ihrer guten Wärmeleitfähigkeit sehr geschätzt.

#### 1. Produktinformationen

**Produktname :** Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung (W-Ni-Cu-Legierung)

**Alias :** Wolframlegierung mit hoher Dichte, Wolfram-Schwerlegierung.

**Anwendung :** Wird in Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt, medizinischen Strahlenschutzteilen, Kühlkörpern und Ausgleichsblöcken in der Elektronikindustrie usw. verwendet .

#### 2. Gefahrenidentifizierung

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung gilt unter normalen Verwendungsbedingungen (in fester Form, wie etwa Platten, Stangen oder bearbeiteten Teilen) im Allgemeinen nicht als gefährlicher Stoff und wird gemäß dem Global Harmonisierten System zur Einstufung und Kennzeichnung (GHS) nicht als gefährlicher Stoff eingestuft.

#### 3. Zusammensetzung/Informationen zu Inhaltsstoffen

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist ein Verbundwerkstoff, dessen Komponenten umfassen:

- **Wolfram (W) :** Der Hauptbestandteil mit einem Anteil von 90–97 % sorgt für hohe Dichte und hohe Härte.
- **Nickel (Ni) :** Bindephase mit einem Anteil von 2–7 %, die Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit verbessert.
- **Kupfer (Cu) :** Bindephase mit einem Anteil von 1–5 %, verbessert die Wärmeleitfähigkeit und die nichtmagnetischen Eigenschaften.
- **Spurenelemente :** können je nach Herstellungsverfahren Spuren von Kobalt, Molybdän oder anderen Verunreinigungen (<0,5 %) enthalten.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5. Maßnahmen zur Brandbekämpfung

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist ein nicht brennbares Material ohne Explosionsgefahr.

## 6. Notfallbehandlung von Leckagen

Eine Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist ein festes Material ohne Leckagegefahr.

## 7. Handhabung und Lagerung

- **Sicherer Betrieb** : Die Verarbeitung muss in einer gut belüfteten Umgebung erfolgen und die Bediener sollten eine Schutzbrille und Handschuhe tragen.
- **Lagerbedingungen** : Trocken und kühl lagern. Feuchtigkeit und hohe Temperaturen vermeiden. Die Produktverpackung sollte stoßfest sein (z. B. Holzkisten oder Kissen), um Schäden während Transport und Lagerung zu vermeiden .

## 8. Physikalische und chemische Eigenschaften

- **Aussehen** : Silbergrauer metallischer Feststoff mit glatter Oberfläche oder zu bestimmten Formen verarbeitet (z. B. Platten, Stäbe, Blöcke).
- **Geruch** : Geruchlos.
- **Schmelzpunkt** : Wolfram hat einen extrem hohen Schmelzpunkt (ca. 3422 °C) und der Schmelzpunkt der Nickel-Kupfer-Bindungsphase liegt bei ca. 1300–1450 °C .
- **Dichte** : Hohe Dichte, typische Werte sind 16,5–18,5 g/cm<sup>3</sup>.
- **Löslichkeit** : Unlöslich in Wasser, beständig gegen Säure- und Laugenkorrosion, einige saure Umgebungen (wie Salpetersäure) können Kupfer leicht korrodieren.
- **Chemische Stabilität** : Stabil bei Raumtemperatur. Bei hohen Temperaturen bildet Nickel eine schützende Oxidschicht, die die Oxidationsbeständigkeit erhöht.

## 9. Stabilität und Reaktivität

- **Stabilität** : Unter normalen Verwendungs- und Lagerbedingungen stabil, keine Zersetzungsgefahr.
- **Reaktivität** : Reagiert nicht heftig mit Wasser, Luft oder üblichen Chemikalien.
- **vermeidende Bedingungen** : Vermeiden Sie oxidierende Umgebungen mit hohen Temperaturen oder langfristigen Kontakt mit starken Säuren (wie konzentrierter Salpetersäure), da diese das Kupfer leicht korrodieren können.

## 10. Hinweise zur Entsorgung

- **Abfallbehandlung** : Klassifizieren und recyceln Sie gemäß den örtlichen Umweltvorschriften (z. B. China GB 5085 oder internationalen Normen für gefährliche Abfälle ) . Zum Recycling

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

von Wolfram, Nickel und Kupfer wird die Verwendung einer chemischen Auflösung oder elektrochemischen Trennung empfohlen.

- **Entsorgung der Verpackung** : Verpackungsmaterialien (wie Holzkisten oder Kunststoffe) sollten recycelt oder gemäß den örtlichen Vorschriften entsorgt werden.

### 13. Versandinformationen

- **Transportklassifizierung** : kein Gefahrgut, keine besonderen Transportanforderungen .
- **Verpackungsanforderungen** : Verwenden Sie stoßfeste und feuchtigkeitsbeständige Verpackungen (z. B. Holzkisten oder Schaumstofffüllungen), um sicherzustellen, dass während des Transports keine Schäden entstehen .

### 14. Regulatorische Informationen

- **Internationale Vorschriften** : Erfüllen Sie den OSHA Hazard Communication Standard (29CFR1910.1200) und die GHS-Anforderungen.
- **Chinesische Vorschriften** : Halten Sie die Vorschriften zum Sicherheitsmanagement gefährlicher Chemikalien und GB/T 26038-2010 (Wolframlegierungsstandard) ein.
- **Sonstiges** : Nickel unterliegt der REACH-Verordnung und der Gehalt muss deklariert werden; die Legierung als Ganzes bedarf keiner speziellen chemischen Registrierung.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Kapitel 4 Leistungstests und Standards von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen

Als Material mit hoher Dichte wird Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung aufgrund ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit 700–900 MPa, Dehnung 5–15 %), ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften, ihrer ausgezeichneten Wärmeleitfähigkeit (120–150 W/ mK ) und ihrer chemischen Stabilität häufig in der Luft- und Raumfahrt, Medizin, Elektronik und im Militär eingesetzt. Um sicherzustellen, dass ihre Leistung den strengen Anwendungsanforderungen (wie z. B. Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt oder medizinische Abschirmteile) entspricht, muss die Qualitätskontrolle durch präzise Leistungstestmethoden und internationale Standards durchgeführt werden. Die Zusammensetzungsanalyse ist das Kernstück der Leistungsprüfung und wirkt sich direkt auf die Dichte, die mechanischen Eigenschaften und die nichtmagnetischen Eigenschaften der Legierung aus. Die Zusammensetzungsanalyse überprüft nicht nur das Verhältnis der Hauptelemente (Wolfram, Nickel, Kupfer), sondern erkennt auch Spuren von Verunreinigungen, um die Reinheit und Leistungskonsistenz der Legierung sicherzustellen.

### 4.1 Methode zur Analyse der Zusammensetzung einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

Wolfram -Nickel-Kupfer-Legierungen bilden die Grundlage der Qualitätskontrolle. Sie dienen dazu, zu überprüfen, ob die Zusammensetzung der Hauptelemente (85–97 % Wolfram, 2–10 % Nickel, 1–8 % Kupfer) den Konstruktionsanforderungen entspricht und sicherzustellen, dass Spurenverunreinigungen (wie Sauerstoff, Kohlenstoff und Schwefel) die Leistung nicht beeinträchtigen. Die Methoden zur Zusammensetzungsanalyse umfassen hauptsächlich Spektralanalyse, chemische Analyse und Oberflächenanalyse, wobei die Spektralanalyse aufgrund ihrer hohen Präzision, Schnelligkeit und Zerstörungsfreiheit die erste Wahl ist. Die Analyseergebnisse müssen internationalen Standards (wie ASTM B777 oder GB/T 26038) entsprechen, um die Zuverlässigkeit der Legierung in Gegengewichten für die Luft- und Raumfahrt, medizinischen Kollimatoren oder Waagenblöcken der Elektronikindustrie zu gewährleisten. Der Nachweis muss in einer sauberen Umgebung erfolgen, und es müssen hochreine Kalibrierproben verwendet werden, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

#### 4.1.1 Spektralanalyse-Technologie

Die Spektralanalyse ist die zentrale Methode zur Analyse der Zusammensetzung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Sie bestimmt die Art und den Gehalt der Elemente durch Messung des von der Probe bei einer bestimmten Wellenlänge emittierten oder absorbierten Spektrums. Diese Methode wird aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit (Nachweisgrenze bis in den ppm-Bereich), Schnelligkeit (Einzelanalyse < 5 Minuten) und der Fähigkeit, mehrere Elemente gleichzeitig zu erkennen, häufig in der Legierungsproduktion und Qualitätskontrolle eingesetzt. Zu den Spektralanalysetechniken gehören Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF), Atomemissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma und Atomabsorptionsspektroskopie (AAS). XRF und ICP-AES sind die am häufigsten verwendeten Methoden und eignen sich zur Überprüfung des Wolfram-, Nickel- und Kupfergehalts sowie der Verteilung von Spurenelementen. Die Röntgenfluoreszenzspektroskopie (RFA) ist ein zerstörungsfreies Analyseverfahren, das Röntgenstrahlen nutzt, um Atome auf der Probenoberfläche zu

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

charakteristischer Fluoreszenz anzuregen. Durch Analyse der Wellenlänge und Intensität wird der Elementgehalt bestimmt. RFA eignet sich für feste Legierungsproben (wie Platten, Stangen oder bearbeitete Teile), erfordert keine aufwändige Vorbehandlung und ermöglicht eine schnelle Bestimmung des Wolfram-, Nickel- und Kupferanteils (Genauigkeit  $\pm 0,2$  %). Ihr Vorteil liegt in der einfachen Handhabung und der Möglichkeit zur Echtzeit-Qualitätskontrolle in der Produktion. Beispielsweise kann bei der Herstellung von Gegengewichten für die Luft- und Raumfahrt mittels RFA schnell überprüft werden, ob die Legierungszusammensetzung dem ASTM B777-Standard entspricht, um sicherzustellen, dass Dichte und nichtmagnetische Eigenschaften den Standards entsprechen. Die Einschränkung der RFA liegt in der geringen Nachweisempfindlichkeit für leichte Elemente (wie Kohlenstoff und Sauerstoff), sodass sie zur ergänzenden Analyse mit anderen Methoden kombiniert werden muss.

Die Atomemissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-AES) ist ein hochpräzises Analyseverfahren zur Bestimmung des Elementgehalts durch Auflösen der Probe, Plasmaanregung und Messung des Emissionsspektrums. ICP-AES eignet sich zum Nachweis von Haupt- und Spurenelementen in Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen mit einer Nachweisgrenze von bis zu ppb. Die Probe muss mit einer Säure (z. B. Salpetersäure oder Königswasser) vorbehandelt und zur Analyse in einer Lösung aufgelöst werden. ICP-AES kann mehrere Elemente gleichzeitig nachweisen und eignet sich für eine umfassende Komponentenanalyse im Labor. Beispielsweise kann bei der Herstellung medizinischer Abschirmteile mithilfe von ICP-AES überprüft werden, ob der Nickelgehalt den Biokompatibilitätsanforderungen der ISO 10993 entspricht, und das Risiko von Allergien durch zu viel Nickel vermieden werden. Nachteile sind die aufwändige Probenvorbehandlung und die Ungeeignetheit für eine schnelle Vor-Ort-Detektion.

Die Wahl der Spektralanalysetechnologie sollte entsprechend den Anwendungsanforderungen und den Gerätebedingungen erfolgen. RFA eignet sich für schnelle, zerstörungsfreie Prüfungen vor Ort, während ICP-AES für hochpräzise Laboranalysen geeignet ist. Zur Kalibrierung während der Analyse sollten hochreine Standardproben ( $> 99,99$  %) verwendet werden, um Matrixeffekte oder Instrumentendrift zu vermeiden, die die Ergebnisse beeinflussen. Umweltkontrollen (z. B. Reinräume oder konstante Temperatur und Luftfeuchtigkeit) können Störungen durch Staub oder Feuchtigkeit reduzieren. Die Qualitätskontrolle überprüft die Zuverlässigkeit der Ergebnisse durch wiederholte Tests und Standardabweichungsanalysen.

#### 4.1.2 Erkennung von Verunreinigungselementen

Die Erkennung von Verunreinigungselementen ist ein wichtiger Bestandteil der Zusammensetzungsanalyse von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Ziel ist die Identifizierung und Quantifizierung von Spurenverunreinigungen (wie Sauerstoff, Kohlenstoff, Schwefel, Stickstoff oder Eisen, üblicherweise  $< 0,5$  %), um sicherzustellen, dass diese die mechanischen Eigenschaften, die Wärmeleitfähigkeit oder die chemische Stabilität der Legierung nicht beeinträchtigen. Verunreinigungen können aus Rohstoffpulvern (Wolfram, Nickel, Kupfer), der Sinteratmosphäre oder der Verarbeitungsumgebung stammen. Überschreitet der Gehalt den Standardwert, kann dies zu mikrostrukturellen Defekten (wie Oxideinschlüssen oder Carbiden) führen und die Zähigkeit,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korrosionsbeständigkeit oder nichtmagnetischen Eigenschaften beeinträchtigen. Zu den Methoden der Verunreinigungserkennung gehören Spektralanalyse, chemische Analyse und spezielle Instrumentenanalyse, die eine hohe Empfindlichkeit (ppb-ppm-Bereich) erreichen muss, um den Anforderungen der Luft- und Raumfahrt-, Medizin- und Elektronikindustrie gerecht zu werden.

Sauerstoff und Kohlenstoff sind die häufigsten Verunreinigungen in Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen und müssen mithilfe spezieller Analysetechniken erkannt werden. Bei der Sauerstoffanalyse wird üblicherweise das Inertgasfusionsverfahren (Inert Gas Fusion) verwendet. Dabei wird die Probe in hochreinem Helium oder Argon auf über 2000 °C erhitzt, wodurch Sauerstoff freigesetzt wird und mit Kohlenstoff zu CO oder CO<sub>2</sub> reagiert. Der Sauerstoffgehalt wird dann mit einem Infrarotdetektor gemessen. Ein hoher Sauerstoffgehalt kann Oxideinschlüsse (wie WO<sub>3</sub> oder NiO) bilden, die die Festigkeit der Grenzflächenbindung verringern und die Korrosionsbeständigkeit von medizinischen Abschirmteilen beeinträchtigen. Bei der Kohlenstoffanalyse wird das Verbrennungsverfahren (Combustion Analysis) verwendet. Dabei verbrennt die Probe in Sauerstoff zu CO<sub>2</sub>. Der Kohlenstoffgehalt wird dann mit einem Infrarotdetektor gemessen. Ein hoher Kohlenstoffgehalt kann Carbide (wie WC) bilden, die die Härte erhöhen, aber die Zähigkeit verringern, was die Schlagfestigkeit von Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt beeinträchtigt.

Verunreinigungen wie Schwefel und Stickstoff werden mittels Glimmentladungs-Massenspektrometrie (GD-MS) oder ICP-AES erkannt. Bei der GD-MS wird die Probenoberfläche durch Glimmentladung angeregt und das Ionenmassenspektrum analysiert. Die Nachweisgrenze kann bis in den ppb-Bereich reichen, was für die Analyse von Mehrelementverunreinigungen geeignet ist. Ein zu hoher Schwefelgehalt kann Sulfideinschlüsse bilden und die Korrosionsbeständigkeit verringern; ein zu hoher Stickstoffgehalt kann zu Korngrenzenversprödung führen und die Stabilität von Ausgleichsgewichten in der Elektronikindustrie beeinträchtigen. Eisen als potenzielle Verunreinigung (aus Rohstoffen oder Verarbeitungswerkzeugen) erfordert besondere Aufmerksamkeit, da es schwachen Magnetismus verursacht, die nichtmagnetischen Eigenschaften der Legierung zerstören und die Leistung der Abschirmteile von MRT-Geräten beeinträchtigen kann. Mittels ICP-AES kann der Eisengehalt genau bestimmt werden, indem die Probe mit Säure aufgelöst und anschließend analysiert wird. Die Prüfung auf Verunreinigungen erfordert eine strenge Kontrolle der Probenvorbereitung und der Umgebungsbedingungen. Die Probenoberfläche muss poliert und mit Ethanol gereinigt werden, um Verunreinigungen zu vermeiden. Analysegeräte müssen regelmäßig kalibriert werden, und hochreine Standardproben gewährleisten die Genauigkeit. Durch die Optimierung des Sinterprozesses kann der Eintrag von Sauerstoff und Stickstoff reduziert werden; durch die Rohstoffprüfung können anfängliche Verunreinigungen kontrolliert werden. Die Qualitätskontrolle überprüft die Gleichmäßigkeit der Verunreinigungsverteilung durch Mehrpunktprobenahme und statistische Analyse. Die Testergebnisse müssen den Standards ASTM B777 oder GB/T 26038 entsprechen, um die Beständigkeit der Legierungseigenschaften sicherzustellen.

#### 4.2 Leistungsprüfverfahren für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen

Wolfram -Nickel-Kupfer-Legierungen werden umfassend auf ihre physikalischen und mechanischen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Eigenschaften geprüft, um die Leistungsfähigkeit der Legierung in der Zielanwendung sicherzustellen. Die Prüfmethode umfasst Dichte- und Kompaktheitsprüfungen, Prüfungen der mechanischen Eigenschaften, der thermischen Eigenschaften und der Mikrostrukturanalyse, die jeweils präzise Daten zu spezifischen Eigenschaften liefern. Dichte- und Kompaktheitsprüfungen verifizieren die Massenverteilung und strukturelle Integrität der Legierung, während Prüfungen der mechanischen Eigenschaften ihre Festigkeit und Zähigkeit unter Belastung bewerten. Diese Prüfungen werden üblicherweise im Labor oder an einem Produktionsstandort mit standardisierten Geräten und Verfahren durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse den strengen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt-, Medizin- und Elektronikindustrie entsprechen. Die Kontrolle der Prüfumgebung ist entscheidend für die Genauigkeit der Ergebnisse.

#### 4.2.1 Dichte- und Kompaktheitsprüfung

Dichte- und Kompaktheitsprüfungen bilden die Grundlage für die Leistungsprüfung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Sie dienen der Bewertung der Massenverteilung und der Kompaktheit der Mikrostruktur der Legierung, die sich direkt auf ihre Leistung in Gegengewichten für die Luft- und Raumfahrt, medizinischen Abschirmteilen und Waagenblöcken der Elektronikindustrie auswirkt. Die Dichte spiegelt die Masse der Legierung pro Volumeneinheit wider und ist der wichtigste Indikator für ihre Dichteigenschaften. Sie stellt sicher, dass die Komponenten eine effiziente Massenverteilung auf begrenztem Raum erreichen. Die Dichte misst den Porengehalt innerhalb der Legierung und spiegelt die Auswirkungen des Herstellungsprozesses (wie Flüssigphasensintern oder heißisostatisches Pressen) wider. Die dichte Mikrostruktur kann die Festigkeit, Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Legierung verbessern.

Bei der Dichtebestimmung wird üblicherweise das archimedische Prinzip verwendet, um die Dichte zu berechnen. Dazu wird der Massenunterschied der Legierungsprobe in Luft und Flüssigkeit (wie Wasser oder Ethanol) gemessen. Diese Methode ist einfach und effizient, eignet sich für feste Proben (wie Stangen, Platten oder bearbeitete Teile) und kann schnell überprüfen, ob die Legierung die vorgesehene Dichte erreicht und die hohen Dichteanforderungen von Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt oder medizinischen Abschirmteilen erfüllt. Während der Prüfung muss die Probe oberflächlich gereinigt und poliert werden, um Öl- oder Oxidschichten zu entfernen und so die Messgenauigkeit zu gewährleisten. Bei der Auswahl der Flüssigkeit muss deren Korrosionsbeständigkeit gegenüber der Legierung berücksichtigt werden, um zu vermeiden, dass Oberflächenreaktionen die Ergebnisse beeinflussen. Die Ergebnisse der Dichtebestimmung spiegeln direkt den Wolframgehalt wider. Legierungen mit höherem Wolframgehalt haben im Allgemeinen eine höhere Dichte und eignen sich für Anwendungen, die eine extrem hohe Massenverteilung erfordern, wie beispielsweise militärische panzerbrechende Kerne.

Die Dichtemessung ermittelt die Porosität innerhalb der Legierung mithilfe einer komplexeren Methode, die üblicherweise Dichtemessung und mikrostrukturelle Analyse kombiniert. Eine gängige Methode besteht darin, die gemessene Dichte mit der theoretischen Dichte zu vergleichen, um auf die Porosität zu schließen. Bei einer anderen Methode wird der Querschnitt der Probe unter einem Mikroskop betrachtet

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und die Verteilung der Wolframpartikel und der Nickel-Kupfer-Bindephasen mittels metallografischer Mikroskopie oder Rasterelektronenmikroskopie analysiert, um das Vorhandensein von Mikroporen oder Einschlüssen zu identifizieren. Legierungen mit hoher Dichte können bessere mechanische Eigenschaften und chemische Stabilität bieten und eignen sich besonders für den Langzeiteinsatz in dynamischen oder korrosiven Umgebungen. Das Flüssigphasensinterverfahren bildet bei hohen Temperaturen eine gleichmäßige Nickel-Kupfer-Matrix, um die Lücken zwischen den Wolframpartikeln zu füllen, während das heißisostatische Pressverfahren die Struktur weiter verdichtet, wodurch die Dichte deutlich verbessert und die negativen Auswirkungen der Porosität auf die Leistung reduziert werden.

In der Praxis gewährleisten Dichte- und Kompaktheitsprüfungen die Zuverlässigkeit von Legierungen in hochpräzisen Szenarien. Beispielsweise gewährleistet im Ausgleichsblock einer Fotolithografiemaschine eine hohe Dichte die Stabilität des Schwerpunkts, und die dichte Mikrostruktur verhindert vibrationsbedingte Mikrorisse. In medizinischen Kollimatoren können hochdichte Legierungen Strahlung effizient absorbieren und gleichzeitig die strukturelle Integrität für den Langzeiteinsatz bewahren. Bei der Testoptimierung muss der Schwerpunkt auf die Gleichmäßigkeit der Probenvorbereitung gelegt werden, um Oberflächendefekte oder innere Einschlüsse zu vermeiden, die die Ergebnisse beeinträchtigen. Umweltkontrolle und hochpräzise Instrumentenkalibrierung sind ebenfalls entscheidend.

#### 4.2.2 Zugfestigkeits- und Streckgrenzenprüfung

Zugfestigkeits- und Streckgrenzenprüfungen sind die wichtigsten Methoden zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Sie dienen der Messung der Bruch- und plastischen Verformungsbeständigkeit der Legierung unter Zugbelastung. Diese Eigenschaften bestimmen direkt die Zuverlässigkeit und Haltbarkeit der Legierung in Gegengewichten für die Luft- und Raumfahrt, militärischen Projektilkernen und vibrationsdämpfenden Komponenten in der Elektronikindustrie. Die Zugfestigkeit spiegelt die Bruchfestigkeit der Legierung unter maximaler Zugspannung wider und eignet sich zur Bewertung ihrer Leistung in Umgebungen mit hoher Belastung. Die Streckgrenze gibt den Spannungswert an, bei dem die Legierung beginnt, sich irreversibel plastisch zu verformen, und spiegelt ihren Verformungswiderstand unter Belastung wider. Die hervorragenden mechanischen Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen beruhen auf dem synergetischen Effekt der hohen Härte der Wolframpartikel und der Zähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase, wodurch die strukturelle Integrität in dynamischen oder stoßbelasteten Umgebungen erhalten bleibt.

Zugfestigkeitsprüfungen werden üblicherweise mit einer Zugprüfmaschine durchgeführt. Die Probe wird in eine Standardform (z. B. eine hantelförmige Probe) gebracht und unter kontrollierten Bedingungen mit einer schrittweise ansteigenden Zugkraft beaufschlagt, bis die Probe bricht. Während der Prüfung wird die Spannungs-Dehnungs-Kurve der Probe aufgezeichnet, um ihr Verhalten während des Zugprozesses zu analysieren. Die hohe Zugfestigkeit der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung beruht auf dem festen Skelett der Wolframpartikel und der gleichmäßigen Verteilung der Nickel-Kupfer-Matrix. Die Nickel-Kupfer-Phase verbindet die Wolframpartikel fest über den Sinterhals, wodurch Spannungen effektiv verteilt und lokale Brüche vermieden werden. Die Prüfung muss in einer Umgebung mit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

konstanter Temperatur (üblicherweise Raumtemperatur) durchgeführt werden, um Temperatureinflüsse auf die mechanischen Eigenschaften auszuschließen. Die Probenvorbereitung erfordert eine glatte und fehlerfreie Oberfläche, um Spannungskonzentrationen zu vermeiden, die zu Ergebnisabweichungen führen. Die Prüfergebnisse dienen dazu, zu überprüfen, ob die Legierung den Standards der Luft- und Raumfahrt- bzw. Militärindustrie entspricht und hohen Belastungen oder Vibrationen standhält.

Die Prüfung der Streckgrenze wird gleichzeitig mit der Prüfung der Zugfestigkeit durchgeführt, und der Punkt, an dem die Legierung beginnt, sich plastisch zu verformen, wird durch Analyse der Spannungs-Dehnungs-Kurve bestimmt. Die Zähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindephase ermöglicht es der Legierung, einer gewissen plastischen Verformung standzuhalten, bevor sie nachgibt, Energie zu absorbieren und Spröbruch zu vermeiden. Die Streckgrenze wird von der Legierungszusammensetzung und -mikrostruktur beeinflusst. Legierungen mit einem höheren Wolframgehalt haben im Allgemeinen eine höhere Streckgrenze, da Wolframpartikel den Hauptwiderstand gegen Verformung bilden. Durch Optimierung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses (z. B. 7:3 oder 3,5:1,5) wird ein Gleichgewicht zwischen Zähigkeit und Festigkeit der Bindephase gewährleistet. Dadurch wird ein zu hoher Nickelgehalt, der die Festigkeit mindert, oder ein zu hoher Kupfergehalt, der die Härte mindert, vermieden. Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen verringern Porosität und Korngrenzendefekte und erhöhen die Streckgrenze durch die Bildung einer dichten Mikrostruktur. Wärmebehandlungsprozesse wie Glühen optimieren das plastische Verhalten der Legierung weiter, indem sie Eigenspannungen eliminieren.

In der Praxis wirken sich die Prüfergebnisse zu Zugfestigkeit und Streckgrenze direkt auf die Auswahl und Konstruktion von Legierungen aus. Beispielsweise stellt bei Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt eine hohe Zugfestigkeit sicher, dass die Komponenten bei hochfrequenten Vibrationen oder Stößen nicht brechen, während die Streckgrenze die Formstabilität unter Belastung gewährleistet. Bei militärischen panzerbrechenden Projektilkernen benötigen Legierungen eine hohe Zugfestigkeit, um Hochgeschwindigkeitsstößen standzuhalten, während die Streckgrenze die strukturelle Integrität des Projektilkerns beim Durchdringen der Panzerung gewährleistet. Die Testoptimierung muss sich auf die Probenkonsistenz konzentrieren und standardisierte Probengrößen und Testverfahren (wie ASTM E8) verwenden. Die Bruchanalyse kann die Zuverlässigkeit der Testergebnisse zusätzlich überprüfen, indem sie duktile oder spröde Brucheigenschaften mittels SEM beobachtet.

#### 4.2.3 Duktilitätsprüfung

Die Duktilitätsprüfung ist eine wichtige Methode zur Bewertung der plastischen Verformungsfähigkeit von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen unter Zugbelastung. Sie spiegelt die Fähigkeit der Legierung wider, unter Belastung durch plastisches Fließen Brüche zu vermeiden. Die Duktilität ist ein wichtiger Indikator für die Zähigkeit und Bearbeitbarkeit einer Legierung und besonders wichtig für Komponenten, die Vibrationen, Stößen oder komplexen Bearbeitungen standhalten müssen, wie z. B. Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt, medizinische Kollimatoren oder vibrationsdämpfende Komponenten in der Elektronikindustrie. Im Vergleich zur Sprödigkeit von reinem Wolfram ist die Duktilität von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen deutlich verbessert, hauptsächlich aufgrund des plastischen Effekts der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nickel-Kupfer-Bindungsphase. Die kubisch-flächenzentrierte Struktur von Nickel bietet hervorragende Duktilität und kann bei Dehnung Energie absorbieren, während die Zugabe von Kupfer die Duktilität und Bearbeitbarkeit der Bindephase weiter verbessert, wodurch die Legierung unter Belastung eine gute plastische Verformbarkeit aufweist.

Die Duktilitätsprüfung erfolgt üblicherweise durch Zugversuche. Dabei werden standardisierte Proben (z. B. hantelförmige Proben) mit schrittweise steigenden Zugkräften auf eine Zugprüfmaschine eingebracht, bis die Probe bricht. Während des Versuchs werden Dehnung und Querschnittsschrumpfung der Probe aufgezeichnet, um den Grad der plastischen Verformung vor dem Bruch zu bestimmen. Die Duktilität von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen beruht auf dem synergistischen Effekt von Wolframpartikeln und Nickel-Kupfer-Bindungsphasen. Wolframpartikel sorgen für hohe Härte und Festigkeit, während die Nickel-Kupfer-Matrix durch Sinterhalse ein durchgehendes Netzwerk bildet, das Spannungen verteilt und plastisches Fließen fördert. Die Prüfergebnisse spiegeln die Fähigkeit der Legierung wider, unter Zugspannung Energie zu absorbieren und eignen sich, um ihre Zuverlässigkeit in dynamischen Umgebungen zu überprüfen. Der Versuch muss in einer kontrollierten Umgebung (z. B. Raumtemperatur und konstante Luftfeuchtigkeit) durchgeführt werden, um die Ergebnisse durch äußere Einflüsse zu eliminieren. Die Probenvorbereitung erfordert eine glatte und fehlerfreie Oberfläche, um Spannungskonzentrationen zu vermeiden, die zu vorzeitigem Bruch führen können.

Die Duktilität wird maßgeblich von der Legierungszusammensetzung und der Mikrostruktur beeinflusst. Ein erhöhter Nickelgehalt verbessert in der Regel die Duktilität, da Nickel aufgrund seiner Zähigkeit größere plastische Verformungen bei Dehnung ermöglicht. Die Zugabe von Kupfer verbessert die Duktilität zusätzlich. Die hohe Duktilität verringert die Härte der Bindephase, wodurch die Legierung unter Belastung anfälliger für plastisches Fließen wird. Das Nickel-Kupfer-Verhältnis muss jedoch sinnvoll gewählt werden, da ein zu hoher Nickel- oder Kupfergehalt die Festigkeit mindern und die Gesamtleistung beeinträchtigen kann. Das Flüssigphasensinterverfahren bildet bei hohen Temperaturen eine gleichmäßige Nickel-Kupfer-Matrix, füllt die Lücken zwischen den Wolframpartikeln, erhöht die Bindungskraft zwischen den Partikeln und fördert die plastische Verformbarkeit. Das heißisostatische Pressverfahren verbessert die Duktilität zusätzlich und reduziert das Bruchrisiko durch die Beseitigung von Mikroporosität und die Optimierung der Grenzflächenbindung. Wärmebehandlungsverfahren wie Glühen bewirken ein gleichmäßigeres Verformungsverhalten der Legierung bei Dehnung, indem Eigenspannungen eliminiert und die Korngrenzenstruktur optimiert werden.

In der Praxis wirken sich die Ergebnisse von Duktilitätstests direkt auf die Anwendbarkeit von Legierungen in anspruchsvollen Szenarien aus. In der Luft- und Raumfahrt beispielsweise müssen Gegengewichte Vibrationen standhalten, die durch Start, Landung oder Turbulenzen verursacht werden. Eine höhere Duktilität stellt sicher, dass die Komponenten unter dynamischer Belastung keine Sprödbrüche erleiden. In der Elektronikindustrie müssen die schwingungsdämpfenden Komponenten der Lithografieplattform geringen Vibrationen standhalten, und eine gute Duktilität gewährleistet die Verformbarkeit und Langzeitstabilität der Komponenten. In der Medizintechnik können Kollimatoren oder Komponenten chirurgischer Roboter während der Verarbeitung oder Installation Dehnungen ausgesetzt sein, und Duktilität verringert ihre Rissneigung. Bei der Testoptimierung muss der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schwerpunkt auf der Probenkonsistenz liegen, indem standardisierte Probengrößen und Testverfahren (wie ASTM E8) verwendet werden. Eine Bruchanalyse kann die Duktilitätsleistung durch Beobachtung duktiler Bruchmerkmale (wie Grübchen) weiter verifizieren.

#### 4.2.4 Zähigkeitsprüfung

Die Zähigkeitsprüfung ist eine wichtige Methode, um die Fähigkeit von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen zu beurteilen, Energie zu absorbieren und bei Stößen oder schnellen Belastungen nicht zu brechen. Sie spiegelt die Rissbeständigkeit und Zuverlässigkeit der Legierung in dynamischen Umgebungen wider. Zähigkeit ist eine Schlüsseleigenschaft der Legierung bei Anwendungen wie Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt, panzerbrechenden Kernen im Militärbereich und Kollimatoren für medizinische Geräte. Sie stellt sicher, dass die Komponenten bei Vibrationen, Stößen oder vorübergehenden Belastungen ihre strukturelle Integrität behalten. Die Zähigkeit von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen ist besser als die von reinem Wolfram, was hauptsächlich auf den plastischen Effekt der Nickel-Kupfer-Bindungsphase zurückzuführen ist. Die kubisch-flächenzentrierte Struktur von Nickel bietet ein gutes Energieabsorptionsvermögen und kann Energie bei einem Aufprall durch plastische Verformung zerstreuen, während die hohe Duktilität von Kupfer die Rissbeständigkeit der Bindephase weiter verbessert, wodurch die Legierung bei Stößen duktile Brucheigenschaften aufweist.

Die Zähigkeitsprüfung erfolgt üblicherweise durch Schlagprüfung. Gängige Methoden sind der Charpy-Schlagversuch und der Fallhammerversuch. Beim Charpy-Schlagversuch wird eine Standardprobe (meist mit V-Kerbe) auf einer Pendelschlagmaschine geprüft und die beim Bruch der Probe absorbierte Energie aufgezeichnet. Beim Fallhammerversuch wird ein schwerer Gegenstand aus einer bestimmten Höhe frei fallen gelassen, um auf die Probe zu treffen und deren Bruchfestigkeit zu bewerten. Die Zähigkeit einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung beruht auf dem synergistischen Effekt von Wolframpartikeln und der Nickel-Kupfer-Bindungsphase. Wolframpartikel sorgen für hohe Härte und Festigkeit, und die Nickel-Kupfer-Matrix verteilt die Aufprallenergie über ein durchgehendes Sinterhalsnetzwerk, um Sprödbrüche zu vermeiden. Der Versuch muss bei kontrollierter Temperatur (z. B. Raumtemperatur) durchgeführt werden, um die Wiederholbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Probe muss auf eine Standardgröße gebracht und die Oberfläche poliert werden, um die Auswirkung von Defekten zu reduzieren.

Die Zähigkeit wird durch die Legierungszusammensetzung, die Mikrostruktur und den Herstellungsprozess beeinflusst. Ein höherer Nickelgehalt verbessert die Zähigkeit deutlich, da Nickel aufgrund seiner Plastizität bei einem Aufprall mehr Energie absorbieren kann und so ein duktiler Bruchmerkmal entsteht. Die Zugabe von Kupfer verbessert die Zähigkeit weiter, und seine Duktilität verringert die Härte der Bindephase, wodurch die Legierung bei einem Aufprall anfälliger für plastische Verformung statt für einen spröden Bruch wird. Das Flüssigphasensintervallverfahren verbessert die Grenzflächenbindung zwischen Wolframpartikeln und der Nickel-Kupfer-Matrix durch Bildung einer dichten Mikrostruktur, wodurch die Rissausbreitung bei einem Aufprall verringert wird. Das heißisostatische Pressverfahren verbessert die Zähigkeit weiter, indem es die Struktur verdichtet und Mikroporen und Korngrenzdefekte beseitigt. Wärmebehandlungsverfahren wie Glühen ermöglichen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Legierung eine gleichmäßigere Energieabsorption bei einem Aufprall, indem sie die Korngrenzenstruktur optimieren und Eigenspannungen eliminieren.

In der Praxis bestimmen die Ergebnisse von Zähigkeitsprüfungen direkt die Eignung von Legierungen für dynamische Umgebungen. In der Luft- und Raumfahrt müssen Hubschrauberrotoren oder Flugzeug-Querruder-Gegengewichte hochfrequenten Vibrationen und Stößen standhalten. Eine hohe Zähigkeit stellt sicher, dass die Komponenten unter extremen Bedingungen nicht spröde brechen. Im Militärbereich müssen panzerbrechende Projektilkerne beim Aufprall auf eine Panzerung mit hoher Geschwindigkeit enorme Energie absorbieren. Eine gute Zähigkeit gewährleistet die Integrität des Projektilkerns. Im medizinischen Bereich können Komponenten von Operationsrobotern versehentlichen Stößen ausgesetzt sein. Dank ihrer Zähigkeit sind sie widerstandsfähiger gegen Risse und behalten ihre Funktion. Bei der Testoptimierung muss der Schwerpunkt auf der Verunreinigungskontrolle liegen, um zu verhindern, dass Verunreinigungen wie Sauerstoff oder Kohlenstoff spröde Phasen bilden, die die Zähigkeit mindern. Oberflächenbehandlungen (wie Polieren oder Beschichten) können Oberflächendefekte reduzieren und die Schlagfestigkeit verbessern. Die Qualitätskontrolle überprüft die Zähigkeit durch Bruchanalysen (REM-Beobachtung von Vertiefungen) und wiederholte Tests.

#### 4.2.5 Thermische Leistungsprüfung

Bei der Prüfung der thermischen Leistung wird die Wärmeleitfähigkeit und Wärmestabilität von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen bewertet. Damit wird die Leistung in Umgebungen mit hohen Temperaturen oder thermischen Zyklen nachgewiesen. Sie eignen sich besonders für Anwendungsszenarien, die ein effizientes Wärmemanagement oder Dimensionsstabilität erfordern, wie beispielsweise Kühlkörper für Fotolithografiemaschinen in der Elektronikindustrie, Strahlenschutz in medizinischen Geräten oder Hochtemperaturkomponenten in der Luft- und Raumfahrt. Zu den thermischen Eigenschaften zählen hauptsächlich die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmeausdehnung, die die Fähigkeit der Legierung zur schnellen Wärmeableitung bzw. Dimensionsstabilität bei Temperaturschwankungen widerspiegeln. Diese Eigenschaften ergeben sich aus der hohen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer und der geringen Wärmeausdehnung von Wolfram, kombiniert mit dem synergetischen Effekt der Nickel-Kupfer-Bindungsphase, wodurch die Legierung ihre Leistung in hochpräzisen und hochtemperierten Umgebungen aufrechterhalten kann.

Die Prüfung der Wärmeleitfähigkeit erfolgt üblicherweise mit dem Laser-Flash-Verfahren oder dem Wärmestrommessgerät. Das Laser-Flash-Verfahren ermittelt die Wärmeleitfähigkeit der Legierung durch die Bestrahlung der Probenoberfläche mit einem kurzen Laserpuls und die Messung der Wärmelaufzeit. Dieses Verfahren eignet sich für die schnelle Prüfung fester Proben (wie Platten oder Blöcke) und kann die Wärmeableitungskapazität der Legierung in der Praxis präzise abbilden. Das Wärmestrommessgerät ermittelt die Wärmeleitfähigkeit durch die Erzeugung eines stabilen Temperaturgradienten auf beiden Seiten der Probe und die Messung der Wärmestromdichte. Beide Verfahren müssen in einer kontrollierten Umgebung (z. B. bei konstanter Temperatur oder im Vakuum) durchgeführt werden, um Störungen durch externe Temperatur oder Luftstrom zu vermeiden. Die Probenvorbereitung erfordert eine glatte Oberfläche und eine gleichmäßige Dicke, um eine gleichmäßige

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeübertragung zu gewährleisten. Die Testergebnisse bestätigen die Rolle von Kupfer in der Nickel-Kupfer-Bindungsphase. Die hohe Wärmeleitfähigkeit ermöglicht der Legierung eine schnelle Wärmeableitung, was sich für Anwendungen mit hoher Wärmebelastung wie Lithografiemaschinen oder medizinischen Geräten eignet. Flüssigphasensintern und heißstatische Pressprozesse verbessern die Wärmeleitfähigkeit zusätzlich, indem sie eine dichte Mikrostruktur bilden und so den Widerstand der Poren und Korngrenzen gegen die Wärmeleitung verringern.

Die Prüfung des Wärmeausdehnungskoeffizienten erfolgt üblicherweise mit einem Dilatometer oder der Differenzial-Scanning-Kalorimetrie (DSC). Ein Dilatometer bewertet die Dimensionsstabilität bei Temperaturschwankungen, indem es die Längenänderung einer Probe während kontrollierter Erwärmung misst. Die Probe wird langsam auf einen bestimmten Temperaturbereich erhitzt und ihre Verformung aufgezeichnet, um zu überprüfen, ob die Legierung ihre Genauigkeit bei Temperaturwechselbelastung behält. Die DSC-Methode ermittelt indirekt die Wärmeausdehnungseigenschaften, indem sie die thermischen Effekte der Probe während des Erhitzens analysiert. Diese Prüfungen müssen in einer präzise kontrollierten Umgebung durchgeführt werden, und die Probenoberfläche muss poliert werden, um Defekte zu eliminieren. Die geringe Wärmeausdehnung von Wolfram ermöglicht der Legierung, ihre Abmessungen auch bei Temperaturschwankungen stabil zu halten, was sie für hochpräzise Anwendungen wie Fotolithografieplattformen geeignet macht. Die gleichmäßig verteilte Nickel-Kupfer-Bindungsphase ist mit einem Sinterhals verbunden, um die thermische Spannungskonzentration zu reduzieren und die thermische Stabilität zu erhöhen. Wärmebehandlungsverfahren wie Glühen verbessern die Leistung der Legierung bei Temperaturwechselbelastung zusätzlich, indem sie die Korngrenzenstruktur optimieren.

In der Praxis gewährleisten thermische Leistungstests die Zuverlässigkeit von Legierungen in Hochtemperatur- oder hochpräzisen Umgebungen. Beispielsweise muss der Ausgleichsblock in Fotolithografiegeräten Wärme schnell ableiten und seine Dimensionsstabilität gewährleisten. Hervorragende Wärmeleitfähigkeit und ein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleisten die Subnanometerpräzision der Plattform. In medizinischen CT-Geräten arbeitet die Abschirmung unter der durch Strahlung erzeugten Wärme, und die thermische Leistung gewährleistet ihre langfristige Stabilität und Sicherheit. Die Testoptimierung muss sich auf die Konsistenz der Probenvorbereitung und der Gerätekalibrierung konzentrieren, um Verunreinigungen ( wie Sauerstoff oder Kohlenstoff) oder Mikroporen zu vermeiden, die die Wärmeleitfähigkeit verringern.

#### 4.2.6 Elektrische Leistungsprüfung

Der Test der elektrischen Leistung dient dazu, die Stromleitfähigkeit und elektromagnetische Verträglichkeit einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung zu bewerten. Er dient der Überprüfung der Leistung in elektromagnetisch sensiblen Umgebungen. Sie eignet sich besonders für Anwendungen wie die Abschirmung medizinischer MRT-Geräte, Komponenten zur Vibrationsreduzierung in Lithografiegeräten oder Komponenten von Radarsystemen. Zu den elektrischen Eigenschaften zählen hauptsächlich Leitfähigkeit und nichtmagnetische Eigenschaften, die die Fähigkeit der Legierung widerspiegeln, Strom zu leiten und elektromagnetische Störungen zu vermeiden. Die nichtmagnetische

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Natur der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist ihr größter Vorteil. Diese resultiert aus dem Paramagnetismus von Nickel und Kupfer, wodurch sie in elektromagnetisch sensiblen Umgebungen gute Leistung bringt. Obwohl die Leitfähigkeit geringer ist als die von reinem Kupfer, reicht sie für die Anforderungen der meisten elektronischen Anwendungen aus. In Kombination mit der hohen Dichte und dem Nichtmagnetismus eignet sie sich für hochpräzise Geräte.

Leitfähigkeitsprüfungen werden üblicherweise mit einer Vierpunktsondenmethode oder einer Widerstandsmessung durchgeführt. Bei der Vierpunktsondenmethode wird ein geringer Strom an die Probenoberfläche angelegt, der Spannungsabfall gemessen und die Leitfähigkeit berechnet. Diese Methode eignet sich für die schnelle Prüfung von Festkörperproben (wie Stäben oder dünnen Platten) und ermöglicht eine präzise Bewertung der Stromleitfähigkeit von Legierungen in elektronischen Anwendungen. Die Widerstandsmessung misst den Widerstand der Probe und leitet anhand ihrer geometrischen Abmessungen die Leitfähigkeit ab. Die Prüfung muss in einer Umgebung mit konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit durchgeführt werden, um den Einfluss von Temperatur oder Luftfeuchtigkeit auf den Widerstand zu vermeiden. Die Probenoberfläche muss poliert und gereinigt werden, um störende Oxidschichten oder Schmutz zu entfernen. Die Testergebnisse spiegeln die dominierende Rolle von Kupfer in der Nickel-Kupfer-Bindungsphase wider. Seine hohe Leitfähigkeit sorgt für einen stabilen Stromleitungspfad der Legierung. Die Zugabe von Nickel bildet eine gleichmäßige Ni-Cu-Mischkristalllösung und erhält eine moderate Leitfähigkeit, während die hohen Widerstandseigenschaften von Wolfram durch die Optimierung der Mikrostruktur kompensiert werden. Flüssigphasensintern und heißisostatische Pressprozesse reduzieren den Einfluss des Korngrenzenwiderstands und der Porosität durch die Bildung einer dichten Mikrostruktur und Verbesserung der Leitfähigkeit.

Nichtmagnetische Prüfungen werden üblicherweise durch Messung der Magnetisierungsintensität oder magnetische Permeabilität durchgeführt. Dabei wird ein Magnetometer oder ein Vibrationsprobenmagnetometer (VSM) verwendet, um die Reaktion der Legierung in einem Magnetfeld zu beurteilen. Die nichtmagnetische Natur der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung profitiert von den paramagnetischen Eigenschaften von Nickel und Kupfer, wodurch ferromagnetische Störungen vermieden werden, und eignet sich für elektromagnetisch empfindliche Anwendungen wie MRT-Geräte oder Fotolithografiemaschinen. Die Prüfung muss in einer abgeschirmten Magnetfeldumgebung durchgeführt werden, um Störungen durch externe Magnetfelder auszuschließen. Die Probe muss einer strengen Verunreinigungskontrolle unterzogen werden, um die Einführung von schwachem Magnetismus durch magnetische Elemente wie Eisen (aus Rohstoffen oder Verarbeitungswerkzeugen) zu vermeiden. Beim Sinterprozess wird eine hochreine Argonatmosphäre verwendet, um zu verhindern, dass Oxideinschlüsse die nichtmagnetischen Eigenschaften beeinträchtigen. Eine Oberflächenbehandlung (wie etwa eine leitfähige PVD-Beschichtung) kann die Legierung zusätzlich schützen und die Stabilität der elektrischen Eigenschaften aufrechterhalten.

In der Praxis gewährleisten elektrische Leistungsprüfungen die Zuverlässigkeit von Legierungen in elektromagnetisch sensiblen Umgebungen. Beispielsweise müssen Abschirmteile in MRT-Geräten nicht magnetisch sein, um Störungen des Magnetfelds zu vermeiden. Eine moderate Leitfähigkeit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gewährleistet den stabilen Betrieb in elektromagnetischen Umgebungen. In Lithografiegeräten gewährleisten die Leitfähigkeit und der Nichtmagnetismus des Ausgleichsblocks die normale Funktion der Plattform in hochpräzisen elektromagnetischen Systemen. Die Testoptimierung muss sich auf das Verunreinigungsmanagement konzentrieren, um zu verhindern, dass Verunreinigungen wie Sauerstoff oder Schwefel nichtleitende Phasen bilden, die die Leitfähigkeit verringern. Die Qualitätskontrolle überprüft die Zuverlässigkeit der Ergebnisse durch wiederholte Tests und Kalibrierungen mit Standardproben.

#### 4.2.7 Chemische Leistungsprüfung

Die Prüfung der chemischen Eigenschaften ist eine wichtige Methode zur Bewertung der Stabilität von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in korrosiven oder oxidierenden Umgebungen. Sie dient der Überprüfung der Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit und stellt die langfristige Zuverlässigkeit der Legierung unter rauen Bedingungen wie Feuchtigkeit, Säure oder hohen Temperaturen sicher. Diese Prüfung ist besonders wichtig für Anwendungen wie die Abschirmung medizinischer Geräte, Gegengewichte im Schiffsbau und Kühlkörper in der Elektronikindustrie, da sie die Leistungsfähigkeit der Komponenten auch in komplexen Umgebungen gewährleistet. Die hervorragenden chemischen Eigenschaften beruhen auf der chemischen Inertheit von Wolfram und der schützenden Wirkung der Nickel-Kupfer-Bindungsphase. Nickel bildet eine dichte Oxidschutzschicht, um das Eindringen korrosiver Medien zu verhindern, während die hohe Stabilität von Wolfram die Beständigkeit der Legierung gegen chemische Erosion erhöht. Die Prüfung der chemischen Eigenschaften umfasst Tests der Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit und muss in einer kontrollierten Umgebung durchgeführt werden, um die tatsächlichen Anwendungsbedingungen zu simulieren.

Korrosionsbeständigkeitsprüfungen werden üblicherweise durch Tauch- oder Salzsprühnebelprüfungen durchgeführt. Bei der Tauchprüfung wird die Legierungsprobe einem korrosiven Medium (wie verdünnter Säure, alkalischer Lösung oder Salzwasser) ausgesetzt und deren Oberflächenveränderungen, Masseverlust oder Korrosionsprodukte unter kontrollierter Temperatur und Zeit beobachtet. Der Test simuliert die Langzeitbedingungen von medizinischen Geräten in sterilisierter Umgebung oder von Schiffskomponenten in Meerwasser, um die Korrosionsbeständigkeit der Legierung zu bewerten. Die Probe muss poliert und gereinigt werden, um oberflächliche Oxidschichten und Schmutz zu entfernen und sicherzustellen, dass die Testergebnisse die Leistung des Materials widerspiegeln. Die Korrosionsbeständigkeit von Nickel in der Nickel-Kupfer-Bindungsphase verleiht der Legierung eine gute Leistung in feuchten oder sauren Umgebungen, insbesondere in medizinischen Anwendungen, wo die Korrosionsbeständigkeit die Biokompatibilität und Haltbarkeit der Komponenten gewährleistet. Salzsprühnebelprüfungen simulieren maritime oder industrielle Umgebungen, indem die Probe einer Salzsprühnebelumgebung (wie neutralem oder saurem Salzsprühnebel) ausgesetzt wird, um Korrosionsflecken oder Oberflächenschäden zu beobachten. Flüssigphasensintern und heißisostatische Pressprozesse reduzieren Poren und Korngrenzenfreilegung durch die Bildung einer dichten Mikrostruktur, verringern den Eindringweg korrosiver Medien und verbessern die Korrosionsbeständigkeit. Die Prüfung der Oxidationsbeständigkeit erfolgt üblicherweise durch Hochtemperaturoxidationstests oder thermogravimetrische Analysen. Bei

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperaturoxidationstests werden Proben einer Hochtemperatur-Luft- oder Sauerstoffumgebung ausgesetzt, um die Bildung von Oberflächenoxidschichten, Massenzunahme oder Leistungsänderungen zu beobachten. Dadurch werden die Bedingungen von Hochtemperatur-Luftfahrtkomponenten oder elektronischen Kühlkörpern im Hochtemperaturbetrieb simuliert. Die Oxidationsbeständigkeit von Nickel bildet bei hohen Temperaturen eine schützende Oxidschicht, die weitere Erosion durch Sauerstoff verhindert, während die hohe thermische Stabilität von Wolfram die strukturelle Integrität der Legierung gewährleistet. Die thermogravimetrische Analyse bewertet Geschwindigkeit und Ausmaß von Oxidationsreaktionen durch die genaue Messung der Massenänderung der Probe während des Erhitzens und eignet sich daher für hochpräzise Labortests. Der Test muss in einem Ofen mit präziser Temperaturregelung durchgeführt werden, und die Probenoberfläche muss glatt sein, um die Auswirkungen von Anfangsdefekten zu reduzieren. Der Sinterprozess verwendet eine hochreine Argonatmosphäre, um Oxideinschlüsse zu vermeiden, die die Oxidationsbeständigkeit beeinträchtigen. Oberflächenbehandlungen (wie chemische Passivierung oder antioxidative Beschichtung) können die Oxidationsbeständigkeit weiter verbessern und die Lebensdauer der Komponenten verlängern.

In der Praxis gewährleistet die Prüfung chemischer Eigenschaften die Zuverlässigkeit von Legierungen in rauen Umgebungen. Beispielsweise gewährleistet Korrosionsbeständigkeit bei medizinischen CT-Abschirmungen die Langzeitstabilität von Komponenten in sterilisierten Umgebungen; bei Gegengewichten von Luft- und Raumfahrtturbinen gewährleistet Oxidationsbeständigkeit die Leistungserhaltung in Hochtemperaturgasumgebungen. Die Testoptimierung muss sich auf die Konsistenz der Probenvorbereitung und die Authentizität der Umweltsimulation konzentrieren, um zu vermeiden, dass Verunreinigungen ( wie Sauerstoff oder Schwefel) oder Oberflächendefekte die Ergebnisse beeinträchtigen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Zuverlässigkeit der Ergebnisse durch wiederholte Tests und Kalibrierungen mit Standardproben.

### 4.3 Standardsystem der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen bilden einen wichtigen Rahmen für ihre Qualität, Leistung und Anwendungskonsistenz. Sie umfassen Zusammensetzungsanforderungen, Leistungskennzahlen, Prüfverfahren und Qualitätskontrollprozesse. Diese Normen werden von internationalen, nationalen und Branchenorganisationen erlassen, um die Produktions-, Prüf- und Anwendungsprozesse zu regeln und so die Konformität und Wettbewerbsfähigkeit der Legierung auf dem Weltmarkt sicherzustellen. Das Normensystem umfasst internationale Normen (wie ASTM B777, ISO 20886), nationale Normen (wie die chinesische GB/T-Reihe) und Branchenstandards (wie MIL-T-21014D) und bietet einen einheitlichen Qualitätsmaßstab für die Luft- und Raumfahrt-, Medizin- und Elektronikindustrie. Chinas nationale Normen spielen eine wichtige Rolle bei der Herstellung und Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen und spiegeln die Besonderheiten der heimischen Technologie und der Marktnachfrage wider.

#### 4.3.1 Chinesischer Nationalstandard für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen

Chinas nationale Normen (GB/T-Reihe) sind die wichtigsten Vorgaben für die Herstellung, Prüfung und Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Sie werden von der Nationalen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Standardisierungsbehörde (NASA) erarbeitet und finden breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, Medizin, Elektronik und im Militär. Diese Normen spezifizieren Zusammensetzung, Leistungsanforderungen, Prüfmethode und Qualitätskontrollprozesse der Legierungen, um sicherzustellen, dass die Produkte den Anforderungen hochzuverlässiger Anwendungen wie Flugzeuggegewichten, medizinischen Kollimatoren oder Ausgleichsblöcken für Fotolithografiemaschinen gerecht werden. Als eines der wichtigsten Wolframressourcenländer der Welt (mit Reserven von rund 3,5 Millionen Tonnen) und Produktionszentrum für Wolframlegierungen hat China eine Reihe von Normen für hochdichte Wolframlegierungen erarbeitet. Als Vertreter der nichtmagnetischen hochdichten Legierungen genießen Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen besondere Aufmerksamkeit.

Einer der wichtigsten Standards in Chinas nationalen Normen ist GB/T 26036-2010 Schwere Wolframlegierungen. Er gilt für hochdichte Legierungen auf Wolframbasis, einschließlich Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen, und spezifiziert den Zusammensetzungsbereich (z. B. 85 % – 97 % Wolfram, Nickel und Kupfer als Bindephasen), Dichteanforderungen, mechanische Eigenschaften und Testmethoden. Der Standard verlangt, dass die Legierung eine hohe Dichte aufweist, um die Anforderungen als Gegengewicht und Abschirmung zu erfüllen, während gleichzeitig nichtmagnetische Eigenschaften betont werden, damit sie für elektromagnetisch empfindliche Umgebungen wie MRT-Geräte geeignet ist. Die Zusammensetzungsanalyse erfordert den Einsatz von Spektroskopietechniken (wie XRF oder ICP-AES), um das Verhältnis von Wolfram, Nickel und Kupfer zu überprüfen, und der Gehalt an Verunreinigungen (wie Sauerstoff und Kohlenstoff) muss streng kontrolliert werden, um Leistungseinbußen zu vermeiden. Tests der mechanischen Eigenschaften umfassen Zugfestigkeit und Duktilität und Zugversuche sind erforderlich, um die Zuverlässigkeit der Legierung unter hoher Belastung zu überprüfen. Bei Tests chemischer Eigenschaften ist eine Bewertung der Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit erforderlich, um die Stabilität der Legierung in feuchten oder heißen Umgebungen sicherzustellen.

Darüber hinaus enthält GB/T 228.1-2010 „Zugversuch an metallischen Werkstoffen, Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur“ Spezifikationen für die Prüfung der mechanischen Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen und gibt Hinweise zur Messung von Zugfestigkeit und Streckgrenze, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse den Anforderungen der Luft- und Raumfahrt sowie des Militärs entsprechen. GB/T 231.1-2018 „Brinellhärteprüfung an metallischen Werkstoffen, Teil 1: Prüfverfahren“ spezifiziert das Härteprüfverfahren zur Bewertung der Oberflächenhärte und der Verarbeitungseigenschaften von Legierungen. GB/T 1423-2012 „Dichtebestimmungsverfahren für Edelmetalle und deren Legierungen“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Dichtepfung, um sicherzustellen, dass die hohen Dichteigenschaften der Legierung den Konstruktionsanforderungen entsprechen. Zusammen bilden diese Normen einen umfassenden Prüfrahen für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen.

Die Anwendung chinesischer Normen hat die Qualität und Wettbewerbsfähigkeit einheimischer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen verbessert. Im medizinischen Bereich stellen die Normen beispielsweise sicher, dass die nichtmagnetischen und korrosionsbeständigen Eigenschaften von

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Abschirmteilen den ISO-Biokompatibilitätsanforderungen entsprechen. In der Elektronikindustrie regeln die Normen die Dichte- und Wärmeleitfähigkeitsprüfung von Ausgleichsblöcken für Fotolithografiemaschinen, um eine hochpräzise Leistung zu gewährleisten. Die Umsetzung der Normen muss mit einer Optimierung der Produktionsverfahren einhergehen, beispielsweise durch Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen zur Verbesserung der Dichte sowie durch strenge Kontrolle der Rohstoffe und der Atmosphäre zur Reduzierung von Verunreinigungen. Die Qualitätskontrolle wird durch standardisierte Mehrpunktprüfungen und Zertifizierungen durch Dritte (z. B. CNAS-Labore) sichergestellt.

#### 4.3.2 Internationale Normen für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen

Internationale Normen sind globale Vorgaben für die Qualitätskontrolle und Marktanwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Sie wurden von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) und anderen maßgeblichen Organisationen entwickelt und finden breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, der Medizin- und Elektronikindustrie. Diese Normen bieten einheitliche Richtlinien für Zusammensetzung, Leistung, Prüfmethode und Qualitätszertifikate der Legierungen und gewährleisten so die Konsistenz und Zuverlässigkeit der Produkte in verschiedenen Ländern und Branchen. Da es sich um hochdichte, nicht magnetische Materialien handelt, konzentrieren sich die internationalen Normen für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen hauptsächlich auf Zusammensetzungsbereich, Dichte, mechanische und nicht magnetische Eigenschaften und eignen sich für hochpräzise und elektromagnetisch empfindliche Anwendungen.

Die Technische Spezifikation ISO 20886:2004 für Wolframlegierungen hoher Dichte, die von der Internationalen Organisation für Normung entwickelt wurde, ist einer der wichtigsten internationalen Standards für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen und gilt für hochdichte Legierungen auf Wolframbasis (einschließlich W-Ni-Cu und W-Ni-Fe). Der Standard spezifiziert den Zusammensetzungsbereich der Legierung (85 % – 97 % Wolframgehalt, Nickel und Kupfer als Bindephasen) und verlangt die Überprüfung ihrer Dichte, mechanischen Eigenschaften (wie Zugfestigkeit und Duktilität) und nichtmagnetischen Eigenschaften. Der Standard betont die Feststellung des Hauptelementverhältnisses durch Spektralanalyse (wie XRF oder ICP-AES), die Bewertung der mechanischen Eigenschaften durch Zugversuche und Schlagprüfungen und die Bestätigung der nichtmagnetischen Eigenschaften durch Tests der Magnetisierungsstärke, um den Anforderungen an Abschirmungen für medizinische MRT-Untersuchungen oder Ausgleichsgewichte in der Elektronikindustrie gerecht zu werden. ISO 20886 verlangt außerdem, dass der Produktionsprozess (wie Flüssigphasensintern oder heißisostatisches Pressen) die Kompaktheit der Mikrostruktur sicherstellen und die Auswirkungen von Poren und Verunreinigungen auf die Leistung reduzieren muss.

Eine weitere relevante internationale Norm ist die ISO 10993-Reihe „Biologische Beurteilung von Medizinprodukten“, die für die Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen im medizinischen Bereich (z. B. CT-Abschirmungen oder Kollimatoren) gilt. Die Norm erfordert die Überprüfung der Biokompatibilität der Legierung, insbesondere die Kontrolle des Nickelgehalts, um allergische Reaktionen zu vermeiden. Korrosions- und Oxidationsbeständigkeitstests müssen den Anforderungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Norm entsprechen, um die Langzeitstabilität der Legierung in sterilisierter oder feuchter Umgebung sicherzustellen. Die internationale Norm verweist zudem auf die ISO 6892-1-Zugprüfung an metallischen Werkstoffen, um die Prüfung mechanischer Eigenschaften zu regeln, die Messung von Zugfestigkeit und Streckgrenze zu leiten und die Zuverlässigkeit der Legierung in Umgebungen mit hoher Beanspruchung sicherzustellen. Zusammen bieten diese Normen technische Unterstützung für die weltweite Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen.

Die Einführung internationaler Normen hat die Verbreitung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen auf dem Weltmarkt gefördert. In der Luft- und Raumfahrt beispielsweise stellen die Normen sicher, dass die hohe Dichte und die nichtmagnetischen Eigenschaften der Gegengewichte den Konstruktionsanforderungen entsprechen. Im medizinischen Bereich gewährleisten sie die Biokompatibilität und Haltbarkeit der Abschirmteile. Der Implementierungsprozess erfordert die Kombination hochpräziser Prüfgeräte (wie SEM oder VSM) und strenger Qualitätskontrollprozesse (wie Zertifizierungen durch Dritte), um die Einhaltung der Normanforderungen zu gewährleisten.

### 4.3.3 Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungsstandards in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern der Welt

Basierend auf internationalen Normen haben die Normen für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern spezifischere und detailliertere Spezifikationen formuliert, die auf die lokale Technologie und Marktnachfrage abgestimmt sind. Diese Normen weisen gewisse Unterschiede in der Zusammensetzungskontrolle, den Leistungsanforderungen und den Prüfmethoden auf, was den Anwendungsschwerpunkt der einzelnen Länder in der Luft- und Raumfahrt-, Medizin- und Elektronikindustrie widerspiegelt. Im Folgenden werden die relevanten Normen der USA, Europas, Japans und Südkoreas erläutert und ihre Merkmale und Anwendungsszenarien hervorgehoben.

**US- Norm :** Die Vereinigten Staaten übernehmen die ASTM B777-15 „Spezifikation für hochdichte Wolframlegierungen“ als Hauptnorm für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen, die für W-Ni-Cu- und W-Ni-Fe-Legierungen gilt. Die Norm unterteilt Wolframlegierungen in vier Kategorien (Klasse 1–4), definiert Leistungsanforderungen basierend auf dem Wolframgehalt (90–97 %) und dem Bindephasenverhältnis und umfasst Dichte, mechanische Eigenschaften (wie Zugfestigkeit und Härte) und nichtmagnetische Tests. ASTM B777 erfordert die Überprüfung der Festigkeit durch Zugprüfung (Referenz ASTM E8) und die Bestätigung der nichtmagnetischen Eigenschaften durch eine Prüfung der Magnetisierungsstärke, die für medizinische MRT-Abschirmteile und Ausgleichsgewichte in der Elektronikindustrie geeignet ist. Die Norm erfordert auch Produktionsprozesse, um sicherzustellen, dass die Mikrostruktur dicht ist und die Porosität reduziert wird. Der US-Militärstandard MIL-T-21014D Wolframbasierte Hochdichtelegerung verfeinert die Anforderungen für militärische Anwendungen, spezifiziert Leistungsindikatoren für panzerbrechende Kerne oder Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt und legt Wert auf Schlagfestigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit. Diese Standards werden in der US-Luftfahrt und im Verteidigungsbereich häufig verwendet, um sicherzustellen, dass die Legierungen hohe Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Europäische Normen** : In Europa wird hauptsächlich die Norm „EN 1982 – Kupfer und Kupferlegierungen – Barren und Gussteile“ sowie andere Normen für hochdichte Legierungen verwendet. Obwohl diese Normen hauptsächlich für kupferbasierte Legierungen gelten, gelten einige Spezifikationen auch für das Gießen und die Verarbeitung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. EN-Normen legen Wert auf die Kontrolle der Zusammensetzung (wie das Verhältnis von Nickel und Kupfer) und die Prüfung der Korrosionsbeständigkeit, was für Anwendungen im Schiffsbau und in der Medizintechnik relevant ist. In Europa wird außerdem die Norm „EN ISO 6892-1 – Zugversuch an metallischen Werkstoffen“ zur Standardisierung mechanischer Eigenschaften verwendet, die die Leistungsfähigkeit von Legierungen in hochbelasteten Umgebungen überprüft. Europäische Normen legen den Schwerpunkt auf Umweltschutz und Biokompatibilität, insbesondere bei medizinischen Anwendungen. Sie fordern die Einhaltung der biologischen Bewertungsnorm „EN ISO 10993“ zur Kontrolle des Nickelgehalts, um Allergierisiken zu vermeiden. Europäische Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen werden hauptsächlich für Schiffsgegengewichte und medizinische Abschirmteile verwendet und legen Wert auf Seewasserkorrosionsbeständigkeit und antimagnetische Eigenschaften.

**Japanische Norm** : Japan verwendet die „JIS H7202 Wolframlegierung mit hoher Dichte“ als Hauptnorm für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen, die für die Luft- und Raumfahrt, Elektronik und Medizin geeignet sind. Die Norm legt den Wolframgehalt (90–95 %) und die Zusammensetzung der Bindungsphase fest, erfordert die Überprüfung der Zusammensetzung durch Spektralanalyse sowie die Bewertung der mechanischen Eigenschaften durch Zug- und Schlagprüfungen. Die japanische Norm legt besonderen Wert auf Prüfungen der nichtmagnetischen Eigenschaften und der Wärmeleitfähigkeit, die für hochpräzise Anwendungen wie Lithografie-Waagenblöcke und MRT-Abschirmteile geeignet sind. „JIS Z2241 Zugprüfverfahren für metallische Werkstoffe“ bietet Richtlinien für die Prüfung mechanischer Eigenschaften, um die Konsistenz der Ergebnisse zu gewährleisten. In Bezug auf die Produktionstechnologie konzentriert sich Japan auf hochreine Rohstoffe und Vakuumsintern, um den Einfluss von Verunreinigungen ( wie Sauerstoff oder Eisen) auf die nichtmagnetischen Eigenschaften und die Korrosionsbeständigkeit zu reduzieren. Die Anwendung japanischer Normen in der Elektronikindustrie ist besonders ausgeprägt und fördert die Verbreitung von Legierungen in Halbleitergeräten.

**Koreanische Norm** : Korea übernimmt KS D 5201 Wolfram und Wolframlegierungen, um die Herstellung und Prüfung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen zu regeln, die für die Luft- und Raumfahrt, Elektronik und das Militär geeignet sind. Die Norm erfordert die Überprüfung der Dichte, der mechanischen und der nichtmagnetischen Eigenschaften der Legierung und stellt durch Spektralanalyse und Prüfung der Magnetisierungsstärke sicher, dass Zusammensetzung und Leistung den Anforderungen entsprechen. Koreanische Normen konzentrieren sich auf die Prüfung der thermischen Leistung (wie Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnungskoeffizient), um den Anforderungen von Kühlkörpern und Ausgleichsblöcken in der Elektronikindustrie gerecht zu werden . Bei der Herstellung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen werden in Korea meist Flüssigphasensintern und heißisostatische Pressverfahren angewendet, um die Dichte der Mikrostruktur sicherzustellen. Die Norm bezieht sich zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften auch auf KS D ISO 6892 Zugversuch an metallischen Werkstoffen und betont die Zuverlässigkeit der Legierung in

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Umgebungen mit hoher Beanspruchung. Koreas rasante Entwicklung in den Bereichen Elektronik und Halbleiter hat die Umsetzung dieser Standards gefördert, um sicherzustellen, dass die Legierungen den Anforderungen hochpräziser Geräte entsprechen.

Die Unterschiede in den Standards verschiedener Länder spiegeln sich hauptsächlich im Anwendungsschwerpunkt und den Prüfdetails wider. Der US-Standard konzentriert sich auf die hohen Festigkeitsanforderungen von Militär und Luft- und Raumfahrt, Europa auf die Korrosionsbeständigkeit in maritimen und medizinischen Anwendungen, Japan legt Wert auf Nichtmagnetizität und hohe Präzision in der Elektronikindustrie und Südkorea auf Elektronik- und Wärmemanagementanwendungen. Die Umsetzung dieser Standards erfordert eine Kombination aus hochpräzisen Prüfgeräten und einer strengen Verunreinigungskontrolle (z. B. Sauerstoffgehalt  $<0,05\%$ ), um die gleichbleibende Leistung der Legierung zu gewährleisten. Die Qualitätszertifizierung wird in der Regel von einer Drittorganisation überprüft, um den internationalen Handel zu fördern.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

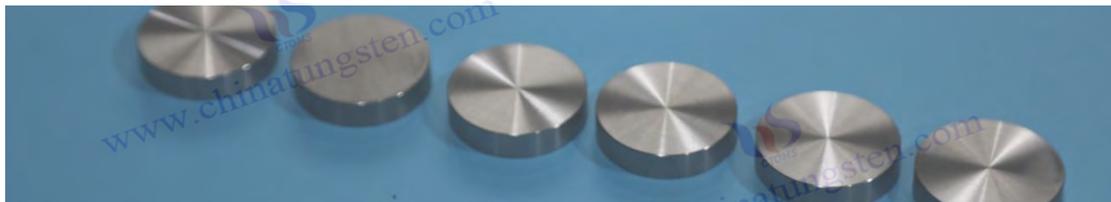
#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Kapitel 5 Herstellungstechnologie von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist ein hochdichter, nicht magnetischer Hochleistungswerkstoff. Aufgrund seiner hervorragenden mechanischen Eigenschaften, Wärmeleitfähigkeit und chemischen Stabilität findet er breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, Medizin, Elektronik und im Militärbereich. Der Herstellungsprozess basiert hauptsächlich auf der Pulvermetallurgie-Technologie. Durch Schritte wie Rohstoffvorbehandlung, Pulvermischen, Pressen, Flüssigphasensintern und Nachbearbeitung wird eine hochdichte und gleichmäßige Mikrostruktur erreicht. Die Rohstoffvorbehandlung ist der Ausgangspunkt des Herstellungsprozesses. Sie beeinflusst direkt die Fließfähigkeit, Mischgleichmäßigkeit und Sintereigenschaften des Pulvers und bestimmt somit die Qualität und Leistung der Legierung. Die Sphäroidisierung und Partikelgrößenkontrolle des Wolframpulvers sowie die Oberflächenbehandlung des Nickel-Kupfer-Pulvers sind zwei Schlüsselfaktoren bei der Rohstoffvorbehandlung, um die hohe Reinheit, geeignete Partikelgröße und Oberflächenaktivität des Pulvers sicherzustellen.

### 5.1 Rohstoffvorbehandlung

Zur Herstellung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen werden hochreines Wolframpulver, Nickelpulver und Kupferpulver als Rohstoffe verwendet. Durch pulvermetallurgische Verfahren wird eine dichte Legierungsstruktur aufgebaut. Die Rohstoffvorbehandlung zielt darauf ab, die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Pulvers, einschließlich Partikelgröße, Morphologie, Reinheit und Oberflächenbeschaffenheit, zu optimieren, um die Fließfähigkeit, die Mischbarkeit und die Sinteraktivität des Pulvers zu verbessern. Wolframpulver als Hauptbestandteil muss eine hohe Reinheit und eine geeignete Partikelgrößenverteilung aufweisen, um die hohe Dichte und die mechanischen Eigenschaften der Legierung zu gewährleisten. Nickelpulver und Kupferpulver als Bindephasen benötigen eine gute Oberflächenaktivität und Benetzbarkeit, um die Verbindung mit Wolframpartikeln beim Flüssigphasensintern zu fördern. Die Rohstoffvorbehandlung umfasst Schritte wie Pulveraufbereitung, Siebung, Reinigung und Oberflächenmodifizierung. Diese müssen in einer sauberen Umgebung durchgeführt werden, um eine Kontamination durch Verunreinigungen (wie Sauerstoff und Kohlenstoff) zu vermeiden. Im Folgenden werden Verfahren und Anwendung der Wolframpulver-Sphäroidisierung, der Partikelgrößenkontrolle und der Nickel-Kupfer-Pulver-Oberflächenbehandlung detailliert erläutert.

#### 5.1.1 Sphäroidisierung von Wolframpulver und Partikelgrößenkontrolle

Die Sphäroidisierung und Partikelgrößenkontrolle von Wolframpulver sind die Kernelemente der Rohstoffvorbehandlung. Sie zielen darauf ab, die Morphologie und Partikelgrößenverteilung des Wolframpulvers zu optimieren, seine Fließfähigkeit, Schüttdichte und Sintereigenschaften zu verbessern und die Dichte und mikrostrukturelle Gleichmäßigkeit der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung direkt zu beeinflussen. Wolframpulver wird üblicherweise durch Wasserstoffreduktion oder ein Plasmaverfahren hergestellt und die anfängliche Morphologie ist meist unregelmäßig polygonal oder eckig, mit einer großen Bandbreite an Partikelgrößen. Durch die Sphäroidisierung tendieren die Wolframpulverpartikel

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zu einer kugelförmigen Form, Kanten und Ecken werden reduziert, die Fließfähigkeit (verkürzte Fließzeit) und Schüttdichte verbessert und das Mischen und Pressen des Pulvers erleichtert. Die Partikelgrößenkontrolle stellt sicher, dass die Partikelgrößenverteilung des Pulvers in einem geeigneten Bereich liegt, verbessert die Partikelumlagerung und -verdichtung während des Sinterns und vermeidet Poren oder Entmischung, die die Legierungseigenschaften beeinträchtigen. Die Sphäroidisierung erfolgt häufig mittels Plasma-Sphäroidisierung oder Hochtemperatur-Schmelzerstäubung. Bei der Plasma-Sphäroidisierung wird Wolframpulver einer Hochtemperatur-Plasmaflamme zugeführt. Dadurch schmelzen die Partikel sofort und bilden unter der Einwirkung der Oberflächenspannung kugelförmige Tröpfchen, die anschließend schnell abkühlen und erstarren. Dieses Verfahren kann die Sphärizität des Wolframpulvers deutlich verbessern, Oberflächendefekte reduzieren und die Fließfähigkeit des Pulvers erhöhen. Dadurch eignet es sich für hochpräzise Anwendungen wie z. B. Ausgleichsblöcke für Fotolithografiemaschinen. Bei der Hochtemperatur-Schmelzerstäubung wird der Wolframrohstoff geschmolzen und zu feinen Tröpfchen versprüht. Diese werden anschließend in einem Inertgas (z. B. Argon) abgekühlt, um kugelförmige Partikel zu bilden, die sich für die Großserienproduktion eignen. Das sphäroidisierte Wolframpulver weist eine höhere Schüttdichte auf, was die Gleichmäßigkeit des gepressten Rohlings fördert und das Risiko einer ungleichmäßigen Sinterschrumpfung verringert.

Die Partikelgrößenkontrolle erfolgt üblicherweise durch Siebung, Luftstromklassifizierung oder Ultraschall-Dispergierung. Bei der Siebmethode wird ein Standardsieb verwendet, um Wolframpulver unterschiedlicher Partikelgröße zu trennen. Diese Methode ist einfach und effizient, weist jedoch eine geringe Genauigkeit auf. Die Luftstromklassifizierung trennt Partikel durch den Luftstrom und kontrolliert die Partikelgrößenverteilung präzise, was für anspruchsvolle Anwendungen geeignet ist. Bei der Ultraschall-Dispergierung werden Ultraschallwellen eingesetzt, um agglomerierte Partikel aufzubrechen und die Gleichmäßigkeit der Partikelgröße zu optimieren. Der richtige Partikelgrößenbereich kann Sinteraktivität und strukturelle Stabilität ausbalancieren. Feinere Partikel verstärken den Lösungs- und Wiederausfällungseffekt beim Sintern und fördern die Verdichtung; gröbere Partikel sorgen für eine stabile Skelettstruktur, die den hohen Festigkeitsanforderungen militärischer panzerbrechender Projektilkerne gerecht wird.

In der Produktion gewährleisten die Sphäroidisierung des Wolframpulvers und die Kontrolle der Partikelgröße die hohe Dichte und die mechanischen Eigenschaften der Legierung. Beispielsweise verbessert sphäroidisiertes Wolframpulver bei Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt die Dichte des Rohlings und gewährleistet die Stabilität des Schwerpunkts. Bei medizinischen Abschirmteilen reduziert eine gleichmäßige Partikelgrößenverteilung die Porosität und verbessert die Strahlungsabsorptionseffizienz. Die Prozessoptimierung muss sich auf die hohe Präzision der Geräte (z. B. Plasmatemperaturregelung) und die Sauberkeit der Umgebung (Reinraumbetrieb) konzentrieren, um Staubkontamination zu vermeiden.

### 5.1.2 Oberflächenbehandlung von Nickel-Kupfer-Pulver

Die Oberflächenbehandlung von Nickel-Kupfer-Pulver ist ein weiterer wichtiger Schritt bei der Vorbehandlung von Rohstoffen. Sie zielt darauf ab, den chemischen Zustand, die Sauberkeit und die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aktivität der Oberflächen von Nickel- und Kupferpulvern zu optimieren und ihre Benetzbarkeit und Bindungsfähigkeit mit Wolframpartikeln während des Flüssigphasensinterns zu verbessern. Nickel und Kupfer bilden als Bindungsphasen während des Sinterns eine flüssige Phase, füllen die Lücken zwischen den Wolframpartikeln und verbessern die Zähigkeit, Nichtmagnetizität und Wärmeleitfähigkeit der Legierung. Unbehandeltes Nickel-Kupfer-Pulver kann eine Oxidschicht (wie NiO oder CuO), organische Schadstoffe oder adsorbierte Gase auf der Oberfläche aufweisen, was seine Benetzbarkeit und Sinteraktivität verringert und eine schlechte Grenzflächenbindung oder erhöhte Porosität zur Folge hat. Die Oberflächenbehandlung verbessert die Pulvereigenschaften durch Reinigung, chemische Modifikation oder Beschichtungstechnologie, um die Kompaktheit und Gleichmäßigkeit der Legierung sicherzustellen. Die Oberflächenreinigung erfolgt üblicherweise chemisch oder per Ultraschall. Bei der chemischen Reinigung werden verdünnte Säuren (wie Salzsäure oder Salpetersäure) oder alkalische Lösungen verwendet, um die Oxidschicht und Verunreinigungen auf der Oberfläche des Nickel-Kupfer-Pulvers zu entfernen. Anschließend wird mit deionisiertem Wasser gespült und im Vakuum oder unter Inertgas (wie Argon) getrocknet, um eine sekundäre Oxidation zu vermeiden. Bei der Ultraschallreinigung werden hochfrequente Ultraschallwellen verwendet, um in der Reinigungsflüssigkeit (wie Ethanol) winzige Bläschen zu erzeugen, die Oberflächenverunreinigungen aufplatzen und entfernen. Dieses Verfahren eignet sich für hochpräzise Anwendungen. Der Reinigungsprozess muss die Lösungskonzentration und -zeit kontrollieren, um übermäßige Korrosion und Schäden an der Pulvermorphologie zu vermeiden. Nach der Reinigung ist die Oberflächenreinheit des Nickel-Kupfer-Pulvers verbessert und die Benetzbarkeit mit der Flüssigphase erhöht, was die Bildung von Sinterhälsen begünstigt.

Chemische Modifikationen verbessern die Sinterereigenschaften von Nickel-Kupfer-Pulver zusätzlich, indem ein Wirkstoff oder ein Reduktionsmittel auf die Oberfläche des Nickel-Kupfer-Pulvers aufgebracht wird. Beispielsweise wird eine geringe Menge eines Reduktionsmittels (wie Wasserstoff oder Ameisensäure) verwendet, um die Pulveroberfläche zu behandeln und Oxide zu reduzieren. Dadurch entsteht eine aktive Metalloberfläche, die die chemische Bindung mit Wolframpartikeln verstärkt. Oberflächenbeschichtungsverfahren (wie chemische Gasphasenabscheidung, CVD) können eine dünne Schicht aus Kohlenstoff oder Metall (wie Ni oder Cu) auf der Oberfläche von Nickel- oder Kupferpulver abscheiden, um die Oxidationsbeständigkeit und Benetzbarkeit zu verbessern und so die Sinterereigenschaften bei hohen Temperaturen zu verbessern. Das modifizierte Pulver bildet beim Flüssigphasensintern eine gleichmäßigere Flüssigphasenverteilung, reduziert die Entmischung und fördert die Neuordnung und Bindung der Wolframpartikel. In der Produktion optimiert die Oberflächenbehandlung von Nickel-Kupfer-Pulver die Mikrostruktur und die Eigenschaften der Legierung. Beispielsweise verbessert oberflächenbehandeltes Nickel-Kupfer-Pulver in Kühlkörpern der Elektronikindustrie die Wärmeleitfähigkeit und die Festigkeit der Grenzflächenbindung. Bei medizinischen Kollimatoren reduziert eine verbesserte Benetzbarkeit die Porosität und verbessert die Strahlenschutzwirkung. Die Prozessoptimierung muss sich auf die Umweltfreundlichkeit der Reinigungslösung und die Sauberkeit der Verarbeitungsumgebung konzentrieren, um Sekundärkontaminationen zu vermeiden. Die Qualitätskontrolle überprüft den chemischen Zustand der Oberfläche mittels XPS- oder EDS-Analyse, kombiniert mit SEM zur Beobachtung der Pulvermorphologie.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5.2 Pulvermetallurgisches Verfahren

Die Pulvermetallurgie ist das wichtigste Verfahren zur Herstellung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Durch Mischen, Pressen und Sintern von Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver entsteht eine hochdichte Legierungsstruktur. Mit diesem Verfahren lassen sich die Komponentenverhältnisse präzise steuern, die Mikrostruktur optimieren und die hohen Leistungsanforderungen von Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt, medizinischen Abschirmteilen und Ausgleichsblöcken in der Elektronikindustrie erfüllen. Der pulvermetallurgische Prozess umfasst Schritte wie Pulvermischen, Pressen, Flüssigphasensintern und Nachbehandlung (wie heißisostatisches Pressen oder Wärmebehandlung). Das Pulvermischen und Pressen ist dabei der Schlüssel zur Bildung eines gleichmäßigen Barrens, der die Partikelumlagerung, die Flüssigphasenverteilung und die Dichte während des Sinterprozesses direkt beeinflusst. Der Prozess muss in einer sauberen Umgebung, unter Verwendung hochreiner Rohstoffe und präziser Geräte durchgeführt werden, um die Konsistenz und Zuverlässigkeit der Legierungsleistung zu gewährleisten.

### 5.2.1 Prozessparameter beim Pulvermischen

Der Pulvermischprozess ist der erste Schritt der Pulvermetallurgie. Ziel ist es, Wolframpulver, Nickelpulver und Kupferpulver im vorgesehenen Verhältnis gleichmäßig zu mischen, um eine Pulvermischung mit gleichmäßiger Komponentenverteilung zu erhalten und so die Grundlage für das anschließende Pressen und Sintern zu legen. Eine gleichmäßige Pulvermischung kann die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur der Legierung gewährleisten, Komponentenseigerung oder übermäßige Porosität vermeiden und so Dichte, mechanische und nichtmagnetische Eigenschaften verbessern. Wolframpulver als Hauptbestandteil sorgt für hohe Dichte und Härte; Nickelpulver und Kupferpulver als Bindephasen verbessern Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Der Erfolg des Pulvermischprozesses hängt von der Optimierung von Pulverpartikelgröße, Morphologie, Mischrüstung und Prozessbedingungen ab, um sicherzustellen, dass die Pulverpartikel vollständig in Kontakt und gleichmäßig verteilt sind.

Beim Pulvermischen wird üblicherweise mechanisches Mischen oder Kugelmahlen verwendet. Beim mechanischen Mischen wird ein V-Mischer oder ein dreidimensionaler Mischer verwendet, um die Pulverpartikel im Behälter durch Rotation oder Vibration zu wirbeln und zu vermischen, was für die Produktion im großen Maßstab geeignet ist. Der Mischer muss über eine hochpräzise Geschwindigkeitsregelung verfügen, um ein übermäßiges Mischen zu vermeiden, das die Partikelmorphologie schädigt oder zu leichter Agglomeration führt. Beim Kugelmahlen werden Mahlkörper (wie Zirkonkugeln) in die Kugelmühle gegeben und durch Kollision und Reibung eine gleichmäßige Pulverdispersion erreicht, was für die hochpräzise Produktion in kleinen Chargen geeignet ist. Das Kugel-Material-Verhältnis und die Mahlzeit müssen während des Kugelmahlvorgangs kontrolliert werden, um ein übermäßiges Mahlen zu vermeiden, das Partikelbruch oder das Eindringen von Verunreinigungen (wie Sauerstoff oder Eisen) verursacht. Die Mischumgebung muss unter hochreinen Inertgas- (wie Argon) oder Vakuumbedingungen erfolgen, um eine Pulveroxidation zu verhindern und die Oberflächenaktivität des Nickel-Kupfer-Pulvers zu erhalten.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Pulvermischprozess dient der Optimierung der Partikelgröße und der Gleichmäßigkeit der Mischung. Wolframpulver hat üblicherweise eine größere Partikelgröße, während Nickel- und Kupferpulver feiner sind. Eine angemessene Partikelgrößenanpassung kann die Packungsdichte der Mischung erhöhen und die Verdichtung beim Pressen und Sintern fördern. Auch die Morphologie des Pulvers ist entscheidend. Kugelförmiges Wolframpulver weist eine hohe Fließfähigkeit auf, die eine gleichmäßige Mischung begünstigt. Die Oberflächenbehandlung von Nickel- und Kupferpulver (z. B. chemische Reinigung) entfernt die Oxidschicht und verbessert den Kontakt zwischen den Partikeln sowie die Benetzbarkeit beim Flüssigphasensintern. Die Optimierung der Prozessbedingungen umfasst Mischzeit, Rotationsgeschwindigkeit und Umweltkontrolle. Eine angemessene Mischzeit gewährleistet Gleichmäßigkeit, während eine zu lange Mischzeit zur Partikelagglomeration oder Oberflächenschäden führen kann. Die Zugabe einer kleinen Menge Schmiermittel kann die Fließfähigkeit des Pulvers verbessern, muss aber vor dem Sintern entfernt werden, um Kohlenstoffrückstände zu vermeiden.

In der Produktion wirkt sich die Gleichmäßigkeit des Pulvermischprozesses direkt auf die Leistung der Legierung aus. Beispielsweise gewährleistet bei medizinischen Abschirmteilen eine gleichmäßige Komponentenverteilung die Strahlungsabsorptionseffizienz und den Nichtmagnetismus; bei Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt verbessert eine gleichmäßige Pulvermischung die Dichtekonsistenz und gewährleistet die Schwerpunktstabilität. Die Qualitätskontrolle überprüft das Komponentenverhältnis durch Probenanalyse (XRF oder ICP-AES) und beobachtet die Gleichmäßigkeit der Mischung und die Partikelmorphologie durch Laser-Partikelgrößenanalyse und SEM. Die Prozessoptimierung muss sich auf die Sauberkeit der Geräte und die Reinheit des Pulvers (> 99,9 %) konzentrieren, um eine Kontamination mit Verunreinigungen zu vermeiden.

### 5.2.2 Presstechnik

Die Presstechnologie ist ein wichtiger Schritt in der Pulvermetallurgie. Dabei werden die gleichmäßig gemischten Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver zu einem Rohling mit einer bestimmten Form und Festigkeit gepresst, der die Grundlage für das anschließende Sintern bildet. Die Qualität des Pressens wirkt sich direkt auf die Dichte, Formgenauigkeit und Sinterleistung des Rohlings aus, was wiederum die endgültigen Eigenschaften der Legierung wie hohe Dichte, Festigkeit und Zähigkeit bestimmt. Beim Pressen muss sichergestellt werden, dass die Pulverpartikel dicht gepackt sind und die Porosität reduziert wird (die anfängliche Porosität beträgt etwa 20–30 %), während die strukturelle Integrität des Rohlings erhalten bleibt. Das Pressen eignet sich für komplex geformte Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt, medizinische Kollimatoren oder Kühlkörper in der Elektronikindustrie. Die Presstechnologie muss die Prozessparameter in Kombination mit den Pulvereigenschaften und den Zielanwendungen optimieren, um sicherzustellen, dass der Rohling die Sinteranforderungen erfüllt.

Beim Pressformen wird üblicherweise Kaltpressen oder isostatisches Pressen verwendet. Beim Kaltpressen wird das Pulver mit einer hydraulischen oder mechanischen Presse in eine Form gefüllt und unter hohem Druck zu einem Rohling mit einer bestimmten Form komprimiert. Diese Methode eignet sich zur Herstellung einfach geformter Teile (z. B. Stangen oder Platten). Bei der Formgestaltung müssen die Fließfähigkeit und das Kompressionsverhältnis des Pulvers berücksichtigt werden, um eine

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gleichmäßige Dichte im Rohling zu gewährleisten und Risse oder Delamination zu vermeiden. Beim isostatischen Pressen (Kaltisostatisches Pressen, CIP) wird ein Rohling mit hoher Dichte geformt, indem das Pulver in eine flexible Form (z. B. einen Gummibeutel) gefüllt und in einem flüssigen Medium in alle Richtungen gleichmäßiger Druck ausgeübt wird. Diese Methode eignet sich für komplexe Formen oder hochpräzise Teile. Durch isostatisches Pressen können Spannungskonzentration und Porosität im Rohling deutlich reduziert werden, und es eignet sich zur Herstellung von medizinischen Abschirmteilen oder Ausgleichsblöcken für Fotolithografiegeräte.

Der Erfolg des Pressformens hängt von der Optimierung der Pulvereigenschaften und der Prozessbedingungen ab. Sphäroidisiertes Wolframpulver und oberflächenbehandeltes Nickel-Kupfer-Pulver weisen eine hohe Fließfähigkeit auf, wodurch beim Pressen eine kompaktere Stapelstruktur entsteht und die Ausgangsdichte des Rohlings erhöht wird. Die Partikelgrößenverteilung des Pulvers muss optimal aufeinander abgestimmt sein, wobei die feinen Partikel die Lücken zwischen den großen Partikeln füllen und so die Porosität reduzieren. Die Zugabe einer geringen Menge Bindemittel (z. B. Polyvinylalkohol) kann die Grünfestigkeit des Rohlings erhöhen, muss jedoch vor dem Sintern durch Entfetten entfernt werden. Der Pressdruck muss an Pulvertyp und Zieldichte angepasst werden. Ein zu hoher Druck kann zu Formverschleiß oder Rohlingsrissen führen, ein zu niedriger Druck führt zu unzureichender Dichte. Umweltkontrollen (z. B. Reinraumbetrieb) vermeiden Staub- und Fremdkontaminationen und erhalten die Reinheit des Rohlings. Der Entfettungsprozess erfolgt nach dem Pressen. Bindemittel und Schmiermittel werden durch Niedertemperaturerhitzung entfernt, um Kohlenstoffrückstände zu vermeiden, die die Sinterqualität beeinträchtigen.

In der Produktion beeinflusst die Presstechnologie direkt die Leistung und Anwendung der Legierung. Beispielsweise gewährleistet der hochverdichtete Block im Kern militärischer panzerbrechender Geschosse nach dem Sintern die hohe Dichte und Festigkeit der Legierung. Im Kühlkörper der Elektronikindustrie verbessert die gleichmäßige Blockstruktur die Wärmeleitfähigkeit und die Maßgenauigkeit. Die Qualitätskontrolle überprüft die Gleichmäßigkeit und Porosität des Blocks durch Dichtemessung (Archimedes-Methode) und mikroskopische Beobachtung. Die Prozessoptimierung muss sich auf die Verschleißfestigkeit der Form und die präzise Druckregelung konzentrieren, wobei hochpräzise Hydraulikanlagen oder automatisierte isostatische Presssysteme zum Einsatz kommen.

### 5.2.3 Flüssigphasensinterprozess

Das Flüssigphasensintern ist ein wichtiger Schritt bei der Herstellung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Es benetzt Wolframpartikel durch die Bildung einer flüssigen Phase mit Nickel und Kupfer bei hohen Temperaturen, fördert die Partikelumlagerung und -verdichtung und bildet eine hochdichte, gleichmäßige Mikrostruktur. Dieses Verfahren nutzt den hohen Schmelzpunkt von Wolfram (ca. 3422 °C) und den niedrigen Schmelzpunkt von Nickel und Kupfer (ca. 1300–1450 °C), um eine enge Bindung der Wolframpartikel unter Einwirkung der Flüssigphase zu erreichen und die mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, Zähigkeit), die Wärmeleitfähigkeit und die nichtmagnetischen Eigenschaften der Legierung zu verbessern. Flüssigphasensintern eignet sich ideal für Hochleistungsanwendungen wie Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt, medizinische Abschirmteile und Kühlkörper in der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektronikindustrie, da es Legierungen nahe der theoretischen Dichte erzeugen und strenge Qualitätsanforderungen erfüllen kann.

Der Flüssigphasensinterprozess wird üblicherweise im Vakuum oder in einer hochreinen Inertgasatmosphäre (z. B. Argon) durchgeführt, um Oxidation und das Eindringen von Verunreinigungen zu verhindern. Der Prozess umfasst drei Phasen: Erhitzen, Isolieren und Abkühlen. In der Heizphase werden die gleichmäßig gemischten Wolfram-, Nickel- und Kupferblöcke über den Schmelzpunkt von Nickel und Kupfer erhitzt. Nickel und Kupfer verschmelzen zu einer flüssigen Phase, die die Oberfläche der Wolframpartikel benetzt. Aufgrund der geringen Oberflächenspannung und der guten Benetzbarkeit der flüssigen Phase füllen flüssiges Nickel und Kupfer schnell die Lücken zwischen den Wolframpartikeln, fördern die Partikelumlagerung durch Kapillarwirkung und reduzieren die Porosität des Blocks deutlich. Die Isolierphase ist der Kern der Verdichtung.

Die flüssige Phase wirkt über einen Lösungs- und Wiederausfällungsmechanismus auf die Wolframpartikel. Eine geringe Menge Wolframatome löst sich auf und scheidet sich an den Kontaktstellen der Partikel wieder aus, wodurch ein Sinterhals entsteht, der die Bindungskraft zwischen den Partikeln erhöht. Die Abkühlungsgeschwindigkeit muss in der Abkühlungsphase kontrolliert werden, um durch thermische Spannung verursachte Risse zu vermeiden. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass die flüssige Nickel-Kupfer-Phase zu einer stabilen kubisch-flächenzentrierten Struktur erstarrt und eine starke Grenzflächenbindung mit den Wolframpartikeln eingeht.

Der Erfolg des Flüssigphasensinterns hängt von der Optimierung der Prozessbedingungen ab. Das Nickel-Kupfer-Verhältnis (typischerweise 7:3 oder 3,5:1,5) beeinflusst Menge und Fließfähigkeit der Flüssigphase. Ein höherer Nickelgehalt kann die Benetzbarkeit verbessern, aber auch zu Entmischung führen; ein höherer Kupfergehalt senkt den Schmelzpunkt der Flüssigphase, was sich positiv auf das Sintern auswirkt, aber Festigkeitsverluste vermeiden muss. Die genaue Kontrolle der Sinter Temperatur und Haltezeit ist entscheidend. Eine zu hohe Temperatur kann zu übermäßigem Wachstum von Wolframpartikeln oder Verlust der Flüssigphase führen, während eine zu niedrige Temperatur zu unzureichender Flüssigphase und reduzierter Dichte führt. Zur Atmosphärenkontrolle wird hochreines Argon oder eine Vakuumumgebung verwendet, um die Bildung von Oxiden (wie  $WO_3$  oder  $NiO$ ) zu verhindern, die die nichtmagnetischen Eigenschaften oder die Korrosionsbeständigkeit beeinträchtigen. Die Anfangsdichte des Blocks (durch Pressen optimiert) beeinflusst ebenfalls den Sinter effekt. Blöcke mit hoher Dichte können die Porosität verringern und die Enddichte erhöhen.

In der Praxis gewährleistet das Flüssigphasensintern die hohe Leistungsfähigkeit der Legierung. Beispielsweise sorgen bei medizinischen Kollimatoren die hohe Dichte und die gleichmäßige Mikrostruktur für hervorragende Strahlenschutz Eigenschaften; bei Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt sorgt die starke Bindungskraft des Sinterhalses für hohe Festigkeit und Vibrationsfestigkeit. Die Qualitätskontrolle überprüft den Prozesseffekt durch Dichtemessung (Archimedes-Methode), REM-Beobachtung der Sinterhalmorphologie und XRD-Analyse der Phasenstruktur. Die Prozessoptimierung erfordert die präzise Kontrolle von Temperaturkurven und Atmosphärenreinheit sowie den Einsatz hochpräziser Sinteröfen und Online-Überwachungssysteme.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5.3 Fortschrittliche Aufbereitungstechnologie

Da die Nachfrage nach komplexen Formen und hochpräzisen Teilen in der Luft- und Raumfahrt, der Medizintechnik und der Elektronikindustrie steigt, stoßen traditionelle pulvermetallurgische Verfahren bei der Herstellung komplexer Geometrien an ihre Grenzen. Moderne Herstellungstechnologien wie Metallspritzguss (MIM), additive Fertigung (AM) und Spark-Plasma-Sintern (SPS) eröffnen neue Möglichkeiten für die Herstellung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Diese Technologien erfüllen die Anforderungen von Hochleistungsanwendungen durch größere Formfreiheit, kürzere Produktionszyklen und optimierte Mikrostrukturen. Metallspritzguss hat sich aufgrund seiner Vorteile bei der Herstellung kleiner, komplex geformter Teile zu einer wichtigen Technologie für die Herstellung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen entwickelt und findet breite Anwendung in medizinischen Geräten, elektronischen Anlagen und militärischen Komponenten.

#### 5.3.1 Metallspritzguss

Metallspritzguss (MIM) ist ein fortschrittliches Fertigungsverfahren, das Pulvermetallurgie und Kunststoffspritzguss kombiniert. Durch Mischen von Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver mit einem Bindemittel entsteht ein fließfähiger Schlicker. Nach dem Spritzgießen wird dieser entfettet und gesintert, um hochdichte Legierungsteile zu bilden. MIM eignet sich besonders für die Herstellung kleiner, komplex geformter und hochpräziser Teile, wie beispielsweise medizinisch-chirurgischer Instrumente, Steckverbinder für die Elektronikindustrie oder kleiner Gegengewichte für die Luft- und Raumfahrt. Seine Vorteile liegen in der hohen Formfreiheit, der hohen Materialausnutzung und der hohen Produktionseffizienz. Im Vergleich zum herkömmlichen Pressformen ermöglicht MIM die Herstellung komplexer geometrischer Strukturen (wie dünner Wände oder Innenkanäle), reduziert die Nachbearbeitung und senkt die Kosten.

Der MIM-Prozess umfasst vier Hauptschritte: Mischen, Spritzgießen, Entbindern und Sintern. In der Mischphase werden Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver (Verhältnis 85–97 % Wolfram, 2–10 % Nickel, 1–8 % Kupfer) mit einem Bindemittel (z. B. Polypropylen oder wachsbasiertes Bindemittel) zu einem gleichmäßigen Brei vermischt. Wolframpulver muss zur Verbesserung der Fließfähigkeit kugelförmig gemacht werden, und die Oberflächen von Nickel- und Kupferpulvern müssen zur besseren Bindung gereinigt werden. Das Mischen muss in einem Hochtemperatur-Rührgerät durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass Pulver und Bindemittel vollständig verteilt sind. In der Spritzgussphase wird der Brei in eine Präzisionsform gespritzt. Bei der Formgestaltung müssen Schwindung und Formgenauigkeit berücksichtigt werden, um einen Grünling mit der Zielgeometrie zu bilden. In der Entbinderungsphase wird das Bindemittel durch thermisches Entbindern oder Lösungsmittelentbindern entfernt, normalerweise durch langsames Erhitzen bei niedriger Temperatur, um Rissbildung oder Verformung des Rohlings zu vermeiden. In der Sinterphase wird Flüssigphasensintern verwendet, und Nickel und Kupfer bilden bei hoher Temperatur eine Flüssigphase, um die Wolframpartikel zu benetzen, die Verdichtung zu fördern und eine Legierungsstruktur nahe der theoretischen Dichte zu bilden.

Der Erfolg von MIM hängt von der Optimierung der Prozessparameter ab. Die Pulverpartikelgröße muss

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fein und gleichmäßig verteilt sein, um die Fließfähigkeit des Schlickers und die Dichte des Rohlings zu verbessern; die Auswahl und der Anteil des Bindemittels beeinflussen die Glätte des Spritzgusses und die Entbinderungseffizienz, und die Fließfähigkeit und Grünfestigkeit müssen ausgewogen sein. Der Sinterprozess erfordert eine präzise Kontrolle von Temperatur und Atmosphäre, und hochreines Argon oder eine Vakuumumgebung wird verwendet, um Oxidation zu verhindern und nichtmagnetische Eigenschaften sicherzustellen. Die endgültige Leistung von MIM-Teilen wird durch Nachbehandlung (wie heißisostatisches Pressen oder Glühen) weiter optimiert, um Restporosität und Spannungen zu beseitigen und Festigkeit und Zähigkeit zu verbessern. Die Qualitätskontrolle überprüft die Leistung der Teile durch SEM-Beobachtung der Mikrostruktur, Dichtemessung und Prüfung der mechanischen Eigenschaften, die den Standards ASTM B777 oder GB/T 26036 entsprechen müssen.

In der Praxis hat die MIM-Technologie die Fertigungsflexibilität von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen deutlich verbessert. Im medizinischen Bereich zeichnen sich beispielsweise komplex geformte Kollimatoren aus MIM durch hohe Präzision und effiziente Strahlenabschirmung aus; in der Elektronikindustrie zeichnen sich Mikrokühlkörper oder -verbinder aus MIM durch hohe Wärmeleitfähigkeit und antimagnetische Eigenschaften aus. Die Prozessoptimierung muss sich auf die hohe Präzision des Formenbaus und die Umweltfreundlichkeit des Bindemittels konzentrieren und abbaubare oder ungiftige Bindemittel verwenden, um die Umweltbelastung zu reduzieren. Zukünftig kann die Kombination von MIM mit additiver Fertigung (z. B. 3D-Druckformen) die schnelle Herstellung komplexerer Formen ermöglichen und das Anwendungspotenzial von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in Hightech-Bereichen erweitern.

### 5.3.2 Heißisostatische Presstechnologie

Heißisostatisches Pressen (HIP) ist ein fortschrittliches pulvermetallurgisches Nachbearbeitungsverfahren, bei dem Barren aus Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in einer Inertgasumgebung bei hoher Temperatur und hohem Druck isotropem Druck ausgesetzt werden, um Mikroporen zu beseitigen, die Dichte zu erhöhen und die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur zu verbessern. Diese Technologie eignet sich besonders für die Herstellung von Hochleistungskomponenten wie Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt, medizinischen Abschirmteilen und Kühlkörpern in der Elektronikindustrie und kann die Dichte, die mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, Zähigkeit) und die Korrosionsbeständigkeit der Legierung deutlich verbessern. Durch das heißisostatische Pressen wird die Struktur nach dem Flüssigphasensintern weiter verdichtet, um winzige Defekte auszugleichen, die beim konventionellen Sintern entstehen können. So erreicht die Legierung eine Dichte nahe der theoretischen Dichte und erfüllt die Anforderungen hochzuverlässiger Anwendungen.

Das heißisostatische Pressverfahren wird üblicherweise in einer speziellen HIP-Anlage durchgeführt, wobei hochreines Argon als Druckmedium verwendet wird. Der Prozess umfasst drei Hauptphasen: Erhitzen, Isolieren und Abkühlen. In der Heizphase wird der gesinterte Block aus der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung in einen geschlossenen Hohlraum gelegt und auf eine Temperatur nahe dem Schmelzpunkt der Nickel-Kupfer-Bindungsphase (ca. 1200–1400 °C) erhitzt, um das Material plastisch zu machen. In der Isolierphase wird hoher isostatischer Druck ausgeübt (üblicherweise in einer

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Argonumgebung), um die Mikroporen im Inneren des Blocks mit gleichmäßigem Druck in alle Richtungen zu komprimieren. Dies fördert die enge Bindung der Wolframpartikel und der Nickel-Kupfer-Bindungsphase. Die Nickel-Kupfer-Phase weist bei hohen Temperaturen eine gewisse Fließfähigkeit auf, füllt die Poren und erhöht die Grenzflächenbindungskraft; die Wolframpartikel behalten ihre kubisch-raumzentrierte Struktur bei und bilden ein stabiles Skelett. Die Abkühlungsphase muss langsam erfolgen, um durch thermische Spannung verursachte Risse zu vermeiden und die Stabilität der Legierungsstruktur sowie die Gleichmäßigkeit der Leistung sicherzustellen.

Der Erfolg des heißisostatischen Pressens hängt von der Optimierung der Prozessbedingungen ab. Eine präzise Kontrolle von Temperatur und Druck ist entscheidend. Die Temperatur sollte der Nickel-Kupfer-Phase ausreichende Fließfähigkeit verleihen, jedoch eine übermäßige Auflösung der Wolframpartikel vermeiden. Der Druck sollte ausreichen, um Porosität zu beseitigen, jedoch nicht zu hoch sein, um eine Überlastung der Anlage zu vermeiden. Hochreines Argon ist wichtig, um die Bildung von Oxiden (wie  $WO_3$  oder  $NiO$ ) zu verhindern, die die Nichtmagnetizität oder Korrosionsbeständigkeit der Legierung beeinträchtigen. Die Anfangsdichte des Barrens (optimiert durch Pulvermischen und -pressen) beeinflusst den HIP-Effekt. Barren mit geringerer Anfangsporosität können effizienter einen Zustand nahe der theoretischen Dichte erreichen. Heißisostatisches Pressen kann auch in einem einzigen Prozessschritt mit Flüssigphasensintern kombiniert werden, um direkt vom pulvergepressten Barren zum endgültigen dichten Teil zu gelangen und so den Produktionszyklus zu verkürzen. In der praktischen Produktion verbessert heißisostatisches Pressen die Leistung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen deutlich. In der Luft- und Raumfahrt beispielsweise weisen HIP-behandelte Gegengewichte eine höhere Dichte und Vibrationsfestigkeit auf, was die Schwerpunktstabilität und langfristige Zuverlässigkeit gewährleistet. In medizinischen Kollimatoren verbessern Strukturen nahe der theoretischen Dichte die Strahlenschutzwirkung und Korrosionsbeständigkeit. Die Qualitätskontrolle überprüft den HIP-Effekt durch Dichtemessung (Archimedes-Methode), REM-Beobachtung der Mikrostruktur und Prüfung mechanischer Eigenschaften. Die Prozessoptimierung muss sich auf die Hochdruckabdichtung und Temperaturgleichmäßigkeit der Geräte konzentrieren und automatisierte Steuerungssysteme zur Verbesserung der Genauigkeit einsetzen.

#### 5.4 Nachbearbeitung und Verarbeitung

Nachbearbeitung und mechanische Bearbeitung bilden die letzten Schritte der Herstellung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Ziel ist die Optimierung der Maßgenauigkeit, Oberflächengüte und Leistungsfähigkeit der Teile nach dem Sintern oder heißisostatischen Pressen, um die strengen Anforderungen der Luftfahrt-, Medizin- und Elektronikindustrie zu erfüllen. Zu den Nachbearbeitungsprozessen gehören Wärmebehandlung, Oberflächenbehandlung und mechanische Bearbeitung, um Eigenspannungen zu beseitigen, die Oberflächengüte zu verbessern und komplexe Geometrien zu erzielen. Die hohe Härte und Zähigkeit von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen machen ihre Verarbeitung anspruchsvoll, doch durch optimierte Prozesse lassen sich hochpräzise und hochwertige Endteile erzielen. Nachbearbeitung und mechanische Bearbeitung verbessern nicht nur die Funktionalität der Teile, sondern erhöhen auch ihre Haltbarkeit und Zuverlässigkeit in rauen Umgebungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Wärmebehandlung ist ein wichtiger Schritt in der Nachbearbeitung und umfasst üblicherweise eine Glüh- oder Alterungsbehandlung. Ziel ist es, die beim Sintern oder HIP entstandenen Eigenspannungen zu beseitigen, die Mikrostruktur zu optimieren und die Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit zu verbessern. Das Glühen repariert Kristalldefekte (wie Versetzungen oder Korngrenzspannungen) in der Nickel-Kupfer-Bindungsphase durch Diffusion durch die Isolierung bei niedriger Temperatur (ca. 800–1000 °C), während die Stabilität der Wolframpartikel erhalten bleibt. Die Alterungsbehandlung fördert die Bildung von Spurenausscheidungsphasen in der Nickel-Kupfer-Phase und erhöht die Festigkeit der Bindungsphase durch langfristige Isolierung bei niedriger Temperatur. Die Wärmebehandlung muss in einer hochreinen Argon- oder Vakuumumgebung durchgeführt werden, um Oxidation zu verhindern und die amagnetische und chemische Stabilität der Legierung zu gewährleisten. Die wärmebehandelten Teile weisen gleichmäßigere mechanische Eigenschaften und eine höhere Ermüdungsbeständigkeit auf und eignen sich daher für Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt oder für medizinisch-chirurgische Instrumente.

Oberflächenbehandlung verbessert die Oberflächenqualität und -leistung von Bauteilen durch Polieren, chemische Passivierung oder Beschichtungstechnologie. Mechanisches oder elektrochemisches Polieren glättet die Oberfläche, reduziert Oberflächendefekte (wie Kratzer oder Mikrorisse), verbessert die Korrosionsbeständigkeit und das ästhetische Erscheinungsbild und eignet sich besonders für medizinische Abschirmungen oder elektronische Kühlkörper. Chemische Passivierung bildet durch Säurelösungsbehandlung eine schützende Oxidschicht, erhöht die Korrosionsbeständigkeit und eignet sich für Anwendungen in Meeresumgebungen oder sterilisierten Umgebungen. Beschichtungstechnologien (wie PVD- TiN- oder DLC-Beschichtung) können die Oberflächenhärte, Verschleißfestigkeit und Oxidationsbeständigkeit weiter verbessern und die Lebensdauer der Bauteile verlängern. Die Oberflächenbehandlung sollte entsprechend den Anwendungsanforderungen ausgewählt werden, um zu dicke Beschichtungen zu vermeiden, die die Wärmeleitfähigkeit oder den Nichtmagnetismus beeinträchtigen.

Die spanende Bearbeitung umfasst Drehen, Fräsen, Schleifen oder Funkenerosion (EDM), um komplexe Formen und hochpräzise Abmessungen zu erzielen. Die hohe Härte von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen erfordert den Einsatz von Hartmetall- oder Diamantwerkzeugen. Um thermische Belastungen und Werkzeugverschleiß zu reduzieren, sind während des Bearbeitungsprozesses niedrige Schnittgeschwindigkeiten und ausreichend Kühlmittel erforderlich. Funkenerosion eignet sich für komplexe Geometrien (wie Innenkanäle oder dünnwandige Strukturen) und entfernt Material durch elektrische Impulse, um die hohe Präzision zu gewährleisten. Die bearbeiteten Teile müssen gereinigt und geprüft werden, um sicherzustellen, dass keine Eigenspannungen oder Oberflächenschäden vorhanden sind. Die Qualitätskontrolle überprüft die Bearbeitungsgenauigkeit und Oberflächenqualität durch Dimensionsmessung (KMG), Oberflächenrauheitsprüfung und REM-Beobachtung.

In der Praxis haben Nachbearbeitung und Verarbeitung die Anwendbarkeit von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen deutlich verbessert. Beispielsweise sorgt im Ausgleichsblock der Fotolithografiemaschine die Präzisionsbearbeitung für eine Genauigkeit im Subnanometerbereich, und Oberflächenpolitur verbessert die Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Im Kern militärischer panzerbrechender

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Geschosse erhöht Wärmebehandlung die Zähigkeit, und die Bearbeitung ermöglicht komplexe Formen. Die Prozessoptimierung muss sich auf die Verschleißfestigkeit der Werkzeuge und die Sauberkeit der Verarbeitungsumgebung konzentrieren und automatisierte Verarbeitungsanlagen zur Effizienzsteigerung einsetzen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Komponentenintegrität durch zerstörungsfreie Prüfungen (z. B. Ultraschall oder Röntgen).

#### 5.4.1 Präzisionsbearbeitung

Die Präzisionsbearbeitung ist ein Schlüsselprozess für die Nachbearbeitung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Sie dient der Verarbeitung gesinterter oder heißisostatisch gepresster Rohlinge zu hochpräzisen Bauteilen mit komplexen Geometrien, die den hohen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt, Medizin- und Elektronikindustrie gerecht werden. Die hohe Härte und Zähigkeit von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen machen ihre Bearbeitung anspruchsvoll. Durch die Optimierung von Werkzeugen und Prozessen lassen sich jedoch Genauigkeiten im Submillimeter- oder sogar Submikrometerbereich erreichen, die sich für Komponenten zur Vibrationsdämpfung in Lithografiemaschinen, medizinische Kollimatoren oder militärische panzerbrechende Kerne eignen. Die Präzisionsbearbeitung gewährleistet nicht nur die Form- und Maßgenauigkeit der Komponenten, sondern verbessert auch die Oberflächengüte und steigert so Leistung und Zuverlässigkeit.

Die Präzisionsbearbeitung umfasst typischerweise Technologien wie Drehen, Fräsen, Schleifen und Funkenerosion (EDM). Drehen und Fräsen nutzen numerisch gesteuerte (CNC) Maschinen zum Schneiden von Legierungen und eignen sich zur Herstellung regelmäßig geformter Teile wie Stangen oder Platten. Die hohe Härte von Wolfram erfordert den Einsatz von hartmetall- oder diamantbeschichteten Werkzeugen. Um thermische Belastung und Werkzeugverschleiß zu reduzieren, sind niedrige Schnittgeschwindigkeiten und ausreichend Kühlmittel (z. B. wasserbasierte Emulsionen) während des Bearbeitungsprozesses erforderlich. Beim Schleifen wird die Oberfläche mithilfe von Schleifscheiben oder Schleifmitteln weiter verfeinert, um eine hohe Oberflächengüte und Maßgenauigkeit zu erreichen. Dies eignet sich insbesondere für die Oberflächenanforderungen medizinischer Abschirmteile oder elektronischer Kühlkörper. EDM verwendet elektrische Impulse, um Materialspuren von leitfähigen Materialien abzutragen. Dies eignet sich für die Herstellung komplexer Formen oder Innenkanäle, beispielsweise für die Mikrostrukturbearbeitung kleiner Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt. EDM ermöglicht hohe Präzision ohne direkten Kontakt und reduziert so Werkzeugverschleiß und Materialbelastung.

Der Bearbeitungsprozess muss optimiert werden, um den Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung gerecht zu werden. Die Zähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase kann dazu führen, dass die Legierung während der Bearbeitung am Werkzeug haften bleibt. Oberflächengrater müssen daher durch Optimierung von Schnittgeschwindigkeit und Vorschub reduziert werden. Die hohe Härte der Wolframpartikel kann zu schnellem Werkzeugverschleiß führen. Um eine gleichbleibende Bearbeitung zu gewährleisten, müssen die Werkzeuge regelmäßig geprüft und ausgetauscht werden. Die Bearbeitungsumgebung muss sauber gehalten werden (Reinraumbetrieb), um Staub und Verunreinigungen zu vermeiden, die die Leistung der Komponenten beeinträchtigen. Bei der Auswahl

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des Kühlmittels müssen Umweltschutz und Korrosionsbeständigkeit der Legierung berücksichtigt werden, um Oberflächenkorrosion oder Rückstände zu vermeiden. Die bearbeiteten Teile müssen per Ultraschall gereinigt werden, um Späne und Kühlmittel zu entfernen und eine saubere Oberfläche zu gewährleisten.

In der Praxis verbessert die Präzisionsbearbeitung die Anwendungsleistung von Teilen aus Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen deutlich. Beispielsweise erreicht die CNC-Bearbeitung im Ausgleichsblock einer Fotolithografiemaschine eine Präzision im Subnanometerbereich und gewährleistet die Stabilität der Plattform. Im Kern militärischer panzerbrechender Geschosse formt die Elektrofunkturbearbeitung komplexe geometrische Formen und verbessert die Durchschlagskraft. Die Qualitätskontrolle überprüft Maßgenauigkeit und Verarbeitung mithilfe von Drei-Koordinatenmessgeräten (KMGs), Laserinterferometern und Oberflächenrauheitsprüfungen. Die Prozessoptimierung muss sich auf die Integration automatisierter Verarbeitungsanlagen und die Verschleißfestigkeit der Werkzeugmaterialien konzentrieren und intelligente CNC-Systeme zur Effizienzsteigerung einsetzen.

#### 5.4.2 Oberflächenbehandlungsverfahren

Die Oberflächenbehandlung ist ein wichtiger Schritt in der Nachbearbeitung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Ziel ist es, die Oberflächenbeschaffenheit, Korrosionsbeständigkeit, Verschleißfestigkeit und Ästhetik der Teile zu verbessern, um den spezifischen Anforderungen der Medizin-, Elektronik- und Luftfahrtindustrie gerecht zu werden. Die Oberflächenqualität von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen beeinflusst ihre Leistung in rauen Umgebungen (wie Sterilisation, Meeresumgebungen oder Hochtemperaturumgebungen) direkt. Die Oberflächenbehandlung verbessert die Korrosionsbeständigkeit, Oxidationsbeständigkeit und Funktionalität der Legierung durch Optimierung des Oberflächenzustands. Zu den Oberflächenbehandlungsverfahren gehören mechanisches Polieren, chemische Passivierung, elektrochemisches Polieren und Beschichtungstechnologie. Die geeignete Behandlungsmethode sollte entsprechend den Anwendungsanforderungen ausgewählt werden.

Mechanisches Polieren ist eine häufig verwendete Methode zur Oberflächenbehandlung. Die Oberfläche des Bauteils wird mit einer Schleifscheibe, einem Poliertuch oder einem Schleifmittel schrittweise abgeschliffen, um Bearbeitungsspuren, Kratzer und kleinere Defekte zu entfernen und eine hochglänzende Oberfläche zu erzielen. Die Oberflächenglätte nach dem Polieren (die Oberflächenrauheit wird reduziert) verbessert sich, was nicht nur die Ästhetik verbessert, sondern auch die Anhaftungspunkte korrosiver Medien reduziert. Dies eignet sich für den Einsatz in medizinischen Kollimatoren oder elektronischen Kühlkörpern. Beim Polieren werden schrittweise verfeinerte Schleifmittel verwendet. Polierdruck und -geschwindigkeit werden kontrolliert, um Überhitzung oder Spannungskonzentrationen an der Oberfläche zu vermeiden. Beim elektrochemischen Polieren wird elektrischer Strom im Elektrolyten angelegt, um die Legierungsoberfläche leicht aufzulösen, die Oberfläche zu glätten und einen dünnen Passivierungsfilm zu bilden, der die Korrosionsbeständigkeit weiter erhöht. Diese Methode eignet sich besonders für Schiffsgegengewichte im maritimen Bereich. Bei der chemischen Passivierung wird durch Eintauchen der Teile in eine saure oder neutrale Lösung (wie verdünnte Salpetersäure oder

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zitronensäurelösung) eine dichte Oxidschutzschicht (hauptsächlich NiO ) auf der Oberfläche gebildet, wodurch die Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit verbessert wird. Bei der Passivierungsbehandlung müssen Lösungskonzentration und Eintauchzeit kontrolliert werden, um übermäßige Korrosion und Oberflächenzersetzung zu vermeiden. Die behandelten Teile weisen eine höhere Stabilität in sterilisierten oder feuchten Umgebungen auf und sind für den Langzeiteinsatz in medizinischen Geräten geeignet. Beschichtungstechnologien (wie physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) oder chemische Gasphasenabscheidung (CVD)) verbessern die Oberflächenhärte, Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit deutlich, indem eine dünne Materialschicht (wie TiN , DLC oder CrN ) auf der Oberfläche abgeschieden wird. Eine PVD- TiN -Beschichtung verleiht Teilen ein goldenes Aussehen und eine ausgezeichnete Verschleißfestigkeit, geeignet für Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt; eine DLC-Beschichtung hat einen niedrigen Reibungskoeffizienten und eignet sich für Gleitteile in der Elektronikindustrie. Die Schichtdicke muss genau kontrolliert werden, um eine Beeinträchtigung der Wärmeleitfähigkeit oder des Nichtmagnetismus zu vermeiden.

Die Oberflächenbehandlung muss in einer sauberen Umgebung durchgeführt werden, um Staub- und Ölverschmutzung zu vermeiden. Vor der Behandlung müssen die Teile mittels Ultraschall gereinigt werden, um Bearbeitungsrückstände zu entfernen. Nach der Behandlung müssen sie mit deionisiertem Wasser gespült und getrocknet werden, um eine Sekundärkontamination zu vermeiden. Die Qualitätskontrolle überprüft die Korrosionsbeständigkeit durch Oberflächenrauheitsprüfungen (z. B. mit einem Profilometer), SEM-Beobachtungen der Oberflächenmorphologie und Salzsprühnebelprüfungen. Die Prozessoptimierung muss sich auf die Umweltfreundlichkeit der Behandlungslösung und die hohe Präzision der Geräte konzentrieren und automatisierte Polier- oder Beschichtungsanlagen einsetzen, um die Konsistenz zu verbessern. In der Praxis verbessert die Oberflächenbehandlung die Anwendungseigenschaften der Legierung deutlich. Beispielsweise verbessert elektrochemisches Polieren bei medizinischen CT-Abschirmteilen die Oberflächengüte und die Desinfektionsbeständigkeit; bei photolithographischen Kühlkörpern erhöhen PVD-Beschichtungen die Verschleißfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Kapitel 6 Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen im Bereich der elektronischen Informationen

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen finden aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften, ihrer hervorragenden Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten breite Anwendung im Bereich der elektronischen Informationsverarbeitung, insbesondere bei Chip-Verpackungen, Wärmeableitungssystemen und hochpräzisen Gegengewichtskomponenten. Die pulvermetallurgisch hergestellte Legierung vereint die hohe Dichte von Wolfram mit der Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase und erfüllt die hohen Anforderungen elektronischer Geräte an Wärmemanagement, elektromagnetische Verträglichkeit und Dimensionsstabilität. Mit der rasanten Entwicklung der 5G-Technologie, künstlicher Intelligenz und des Internets der Dinge steigt die Nachfrage nach Hochleistungsmaterialien im Bereich der elektronischen Informationsverarbeitung. Aufgrund ihrer einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften eignen sich Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen ideal für Chip-Verpackungen, HF-Module und Fotolithografiegeräte.

### 6.1 Chip-Packaging und Wärmeableitung

Chip-Verpackung und Wärmeableitung sind Kerntechnologien im Bereich der elektronischen Information. Sie beinhalten die Befestigung des Chips auf dem Substrat und die effiziente Ableitung der während des Betriebs erzeugten Wärme, um die hohe Leistung und lange Lebensdauer des Geräts sicherzustellen. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung wird als Wärmeableitungssubstrat, Kühlkörper und Gegengewichtskomponente in der Chip-Verpackung verwendet. Mit seiner hohen Wärmeleitfähigkeit, dem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und seinen nichtmagnetischen Eigenschaften kann es Wärme effektiv ableiten, die Dimensionsstabilität wahren und elektromagnetische Störungen vermeiden, um den Anforderungen von elektronischen Geräten mit hoher Leistung und hoher Frequenz gerecht zu werden. Die Mikrostruktur der Legierung wird durch Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen optimiert, um ein dichtes Netzwerk aus Wolframpartikeln und Nickel-Kupfer-Bindungsphasen zu bilden, das hervorragende Wärmeleitfähigkeit und mechanische Stabilität bietet. Seine Anwendungen umfassen hochpräzise Geräte wie Hochleistungsgeräte, 5G-HF-Module und Lithografiemaschinen und leisten einen wichtigen Beitrag zur Leistungsverbesserung und Miniaturisierung der elektronischen Informationsindustrie.

#### 6.1.1 Wärmeableitungssubstrat für Hochleistungsgeräte

Das Wärmeableitungssubstrat von Hochleistungsgeräten ist eine Schlüsselkomponente des Chip-Gehäuses. Es dient dazu, die hohe Wärme, die der Chip während des Betriebs erzeugt, schnell abzuleiten und so zu verhindern, dass Überhitzung zu Leistungseinbußen oder Geräteausfällen führt. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen eignen sich aufgrund ihrer hervorragenden Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ideal als Wärmeableitungssubstrate für Hochleistungsgeräte (wie Leistungsverstärker, GPUs und Laserdioden). Die hohe Wärmeleitfähigkeit der Legierung beruht auf der hohen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer, das die vom Chip erzeugte Wärme schnell an das

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeableitungssystem ableiten kann. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient entspricht den Wärmeausdehnungseigenschaften von Chipmaterialien (wie Silizium oder Galliumnitrid), reduziert Verformungen oder Risse durch thermische Belastung und gewährleistet die langfristige Stabilität der Gehäusestruktur. Die nichtmagnetische Eigenschaft verhindert elektromagnetische Störungen und eignet sich für elektronische Hochfrequenzgeräte.

Während des Herstellungsprozesses wird die Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung durch ein pulvermetallurgisches Verfahren zu einem hochdichten Substrat geformt. Flüssigphasensintern sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Nickel-Kupfer-Bindungsphase, was die Wärmeleitfähigkeit verbessert. Heißisostatisches Pressen beseitigt Mikroporen und verbessert Dichte und Festigkeit des Substrats. Präzisionsbearbeitung und Oberflächenbehandlung (wie elektrochemisches Polieren oder PVD-Beschichtung) optimieren die Oberflächenbeschaffenheit des Substrats, reduzieren den Wärmewiderstand und verbessern die Kontakteffizienz mit dem Chip. Die Oberfläche des Wolfram-Nickel-Kupfer-Substrats wird üblicherweise durch Schweiß- oder Klebprozesse mit dem Chip verbunden. Dabei ist eine feste Verbindung der Schnittstelle sicherzustellen, um ein Ablösen oder Reißen während thermischer Zyklen zu vermeiden. In Hochleistungsgeräten verbessert die Verwendung von wärmeableitenden Wolfram-Nickel-Kupfer-Substraten die Geräteleistung deutlich. Beispielsweise gewährleistet bei Hochleistungsrechnerchips (HPC) die schnelle Wärmeableitung des Substrats die Stabilität des Chips unter hoher Belastung. Bei Laserdioden gewährleistet der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient die Positionsgenauigkeit optischer Komponenten. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Anpassung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, den Einsatz von Nanobeschichtungen (z. B. DLC) zur Reduzierung des Oberflächenwärmewiderstands oder die Kombination additiver Fertigungsverfahren zur Anpassung komplexer Wärmeableitungsstrukturen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Substrateigenschaften durch Wärmeleitfähigkeitsprüfungen (Laser-Flash-Verfahren) und Messungen des Wärmeausdehnungskoeffizienten, um die Einhaltung von Standards der Elektronikindustrie (z. B. JEDEC) sicherzustellen.

### 6.1.2 Gegengewicht-Kühlkörper des 5G-HF-Moduls

Der Gegengewichtskühlkörper für 5G-HF-Module ist eine Schlüsselkomponente in 5G-Kommunikationsgeräten. Er dient sowohl der Wärmeableitung als auch dem Gegengewicht, um das Wärmemanagement des Moduls und die Schwerpunktstabilität im Hochfrequenzbetrieb zu gewährleisten. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist aufgrund ihrer hohen Dichte, nicht magnetischen Eigenschaften, hohen Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten das bevorzugte Material für Gegengewichtskühlkörper für HF-Module. 5G-HF-Module müssen mit Hochfrequenzsignalen (Millimeterwellen) betrieben werden, die viel Wärme erzeugen und gleichzeitig Miniaturisierung und hohe Präzision erfordern. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung kann Wärme schnell ableiten, die Dimensionsstabilität bewahren und elektromagnetische Störungen vermeiden, wodurch die hohen Leistungsanforderungen des Moduls erfüllt werden. Die hohe Dichte ermöglicht es der Legierung, auf begrenztem Raum ein ausreichendes Gegengewicht bereitzustellen, die Schwerpunktverteilung des Moduls zu optimieren und die Auswirkungen von Vibrationen auf die Signalübertragung zu reduzieren.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Im Herstellungsprozess werden Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen verwendet, um komplex geformte Gegengewichtskühlkörper mittels Metallspritzguss (MIM) oder Pulvermetallurgie herzustellen. Die MIM-Technologie formt durch Mischen von Pulver mit Bindemittel, Spritzgießen, Entfetten und Sintern hochpräzise Komponenten, die den komplexen geometrischen Anforderungen miniaturisierter Module gerecht werden. Durch Flüssigphasensintern benetzt die flüssige Nickel-Kupfer-Phase die Wolframpartikel und bildet so eine dichte Mikrostruktur, die die Wärmeleitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften verbessert. Oberflächenbehandlungen (wie PVD- TiN- Beschichtung oder elektrochemisches Polieren) verbessern die Korrosionsbeständigkeit und Oberflächenbeschaffenheit, reduzieren den Wärmewiderstand und erhöhen die Oxidationsbeständigkeit. Die Präzisionsbearbeitung in der Nachbearbeitung gewährleistet die Maßgenauigkeit der Komponenten und erfüllt die strengen Toleranzanforderungen von 5G-Modulen.

In 5G-HF-Modulen verbessern Wolfram-Nickel-Kupfer-Gegengewichtskühlkörper die Modulleistung deutlich. Beispielsweise sorgt die hohe Dichte der Legierung in Antennenmodulen von Basisstationen für die Stabilität des Antennenschwerpunkts, und die Wärmeleitfähigkeit leitet die Wärme des HF-Chips schnell ab, um die Signalübertragung stabil zu halten. In mobilen Endgeräten (wie Smartphones) unterstützen miniaturisierte Gegengewichtskühlkörper das kompakte Design des Moduls und gewährleisten gleichzeitig ein effizientes Wärmemanagement. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Optimierung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, die Verbesserung der Wärmeableitung durch Mikrostrukturdesigns (z. B. wabenförmige Wärmeableitungskanäle) oder die Kombination von heißisostatischer Presstechnologie zur weiteren Verbesserung der Dichte. Die Qualitätskontrolle überprüft die Komponentenleistung durch Dichtemessung, Wärmeleitfähigkeitsprüfung und Magnetisierungsstärkeprüfung, um die Einhaltung der 5G-Kommunikationsstandards (wie 3GPP) sicherzustellen.

## 6.2 Mikrowellen- und Radargeräte

Mikrowellen- und Radargeräte sind die Kerntechnologie im Bereich der elektronischen Information. Sie finden breite Anwendung in Kommunikation, Navigation, Fernerkundung und Landesverteidigung. Sie erfordern Materialien mit hoher Dichte, Antimagnetismus, hoher Wärmeleitfähigkeit und Dimensionsstabilität, um die Leistung der Geräte bei hohen Frequenzen, hoher Leistung und in komplexen Umgebungen zu gewährleisten. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen haben sich aufgrund ihrer einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften zum bevorzugten Material für Antennengewichtskomponenten und Abschirmkomponenten in Mikrowellen- und Radargeräten entwickelt. Ihre hohe Dichte ermöglicht eine präzise Schwerpunktkontrolle, ihre Antimagnetizität verhindert elektromagnetische Störungen, ihre hohe Wärmeleitfähigkeit und ihr niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleisten Wärmemanagement und Dimensionsstabilität und erfüllen die Zuverlässigkeitsanforderungen von Geräten in extremen Umgebungen (wie hohen Temperaturen, Vibrationen oder elektromagnetischen Störungen). Durch Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen, kombiniert mit Präzisionsbearbeitung und Oberflächenbehandlung, bildet die Legierung eine dichte Mikrostruktur, um die hohen Präzisionsanforderungen von Mikrowellen- und Radargeräten zu erfüllen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 6.2.1 Montage des Antennengewichts

Antennengewichtskomponenten sind Schlüsselkomponenten von Mikrowellen- und Radargeräten. Sie dienen der Anpassung der Schwerpunktverteilung der Antenne, um ihre Stabilität und Zielgenauigkeit in dynamischen Umgebungen (wie Satellitenbewegungen oder Schiffsvibrationen) sicherzustellen. Eine Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist aufgrund ihrer hohen Dichte und nichtmagnetischen Eigenschaften ein ideales Material für Antennengewichtskomponenten. Durch die hohe Dichte bietet die Legierung ausreichend Masse innerhalb eines begrenzten Volumens, optimiert die Schwerpunktposition des Antennensystems und reduziert Abweichungen durch Vibrationen oder Windlast. Die nichtmagnetische Eigenschaft vermeidet Magnetfeldstörungen und gewährleistet die Genauigkeit und Stabilität der Antenne bei der Übertragung von hochfrequenten Mikrowellensignalen (wie Ku-Band oder Millimeterwellen). Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient der Legierung gewährleistet Dimensionsstabilität bei Temperaturschwankungen (wie Temperaturunterschieden zwischen Tag und Nacht oder niedrigen Temperaturen in großen Höhen) und erhält die geometrische Genauigkeit der Antenne.

Im Herstellungsprozess werden Antennengewichtskomponenten aus einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung mittels Pulvermetallurgie hergestellt. Dabei kommen üblicherweise Metallspritzguss (MIM) oder kaltisostatisches Pressen zum Einsatz, um komplex geformte Knüppel zu formen und so den Anforderungen an kompaktes Design von Antennensystemen gerecht zu werden. Durch Flüssigphasensintern benetzt die flüssige Nickel-Kupfer-Phase die Wolframpartikel und bildet eine dichte Mikrostruktur, die die Dichte und die mechanischen Eigenschaften der Gewichtskomponenten verbessert. Durch heißisostatisches Pressen werden Mikroporen zusätzlich eliminiert und die Dichte verbessert, wodurch sich das Verfahren für hochzuverlässige Anwendungen wie Satellitenantennen eignet. Präzisionsbearbeitung (z. B. CNC-Fräsen oder EDM) gewährleistet die Maßgenauigkeit der Gewichtskomponenten. Oberflächenbehandlungen (z. B. elektrochemisches Polieren oder PVD-Beschichtung) verbessern Korrosionsbeständigkeit und Oberflächengüte und reduzieren Signalstreuung oder Umwelterosion.

In Antennenanwendungen verbessern Gewichtskomponenten aus Wolfram-Nickel-Kupfer die Geräteleistung deutlich. Beispielsweise gewährleisten hochdichte Gewichte bei 5G-Basisstationsantennen die Stabilität der Antenne bei hochfrequenten Vibrationen, und die nichtmagnetischen Eigenschaften verhindern Signalstörungen. Bei Satellitenkommunikationsantennen sorgt der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient für die Zielgenauigkeit in großen Höhen. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Optimierung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch Mikrostrukturdesign (z. B. interne Verstärkungsrippen) oder die Anpassung komplexer Formen in Kombination mit additiver Fertigungstechnologie.

### 6.2.2 Radarabschirmkomponenten

Radarabschirmkomponenten werden verwendet, um elektromagnetische Störungen zu isolieren,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Streusignale zu absorbieren oder empfindliche elektronische Komponenten in Radargeräten zu schützen, um einen stabilen Betrieb des Systems in Hochfrequenz- und Hochleistungsumgebungen zu gewährleisten. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen sind aufgrund ihrer Nichtmagnetizität, hohen Dichte und ausgezeichneten Wärmeleitfähigkeit das bevorzugte Material für Radarabschirmkomponenten. Die Nichtmagnetizität vermeidet Störungen der Radarsignale durch Magnetfelder, was sich besonders für hochempfindliche Radarsysteme (wie Phased-Array-Radare) eignet. Dank der hohen Dichte kann die Legierung elektromagnetische Wellen wirksam absorbieren und abschirmen, wodurch Signallecks oder externe Störungen reduziert werden. Die Wärmeleitfähigkeit leitet die vom Radarsender oder -empfänger erzeugte Wärme schnell ab, um zu verhindern, dass Überhitzung die Geräteleistung beeinträchtigt. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient stellt sicher, dass die Komponenten in Umgebungen mit hohen Temperaturen oder thermischen Zyklen formstabil bleiben, um Verformungen zu vermeiden, die die Abschirmwirkung beeinträchtigen.

Im Herstellungsprozess werden Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen zur Herstellung von Abschirmkomponenten mittels Pulvermetallurgie oder MIM-Technologie verwendet, um den Anforderungen komplexer Formen und kompakter Designs gerecht zu werden. Flüssigphasensintern bildet eine dichte Mikrostruktur mit gleichmäßig verteilter Nickel-Kupfer-Bindungsphase, die die Wärmeleitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften verbessert. Heißisostatisches Pressen beseitigt Restporosität, verbessert die Dichte und Haltbarkeit der Abschirmkomponenten und erfüllt die hohen Anforderungen von Militär- und Flugradaren. Durch Präzisionsbearbeitung (z. B. Schleifen oder Funkenerosion) wird eine hochpräzise Geometrie erreicht, die eine nahtlose Integration der Komponenten in Radarsysteme gewährleistet. Oberflächenbehandlungen (z. B. PVD- CrN-Beschichtung oder chemische Passivierung) verbessern die Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit und verlängern die Lebensdauer der Komponenten in feuchten oder heißen Umgebungen.

In Radaranwendungen verbessern Wolfram-Nickel-Kupfer-Abschirmkomponenten die Systemzuverlässigkeit deutlich. Beispielsweise vermeiden nichtmagnetische Abschirmkomponenten bei militärischen Phased-Array-Radaren Signalstörungen, und eine hohe Dichte verbessert die elektromagnetische Abschirmwirkung. Bei Wetterradaren gewährleistet die Wärmeleitfähigkeit das Wärmemanagement von Hochleistungsendern. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Leitfähigkeit durch Anpassung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, den Einsatz mehrschichtiger Verbundbeschichtungen zur Verbesserung der Abschirmwirkung oder die Kombination von 3D-Drucktechnologie zur Herstellung komplexer Abschirmstrukturen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Komponentenleistung durch elektromagnetische Abschirmtests (z. B. MIL-STD-461), Wärmeleitfähigkeitstests und Salzsprühstests, um die Einhaltung von Radarsystemstandards (z. B. IEC 61000) sicherzustellen.

### 6.3 Mikroelektromechanische Systeme

Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) sind Technologien, die Mikroelektronik mit mechanischen Strukturen im Mikrometer- bis Millimeterbereich integrieren. Sie finden breite Anwendung in Smartphones, Autos, medizinischen Geräten und der Luft- und Raumfahrt, beispielsweise in

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beschleunigungsmessern, Gyroskopen und Mikroaktoren. MEMS-Geräte benötigen Materialien mit hoher Dichte zur Realisierung miniaturisierter Gegengewichte, nichtmagnetischen Eigenschaften zur Vermeidung elektromagnetischer Störungen, ausgezeichneter Wärmeleitfähigkeit zur Wärmeregulierung auf kleinstem Raum und niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten zur Gewährleistung der Dimensionsstabilität. Mit ihrer hohen Dichte und ihren nichtmagnetischen Eigenschaften können Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen ausreichend Masse in einem winzigen Volumen bereitstellen und die Schwerpunktverteilung von MEMS-Geräten optimieren; ihre hohe Wärmeleitfähigkeit und ihr niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleisten Wärmemanagement und Langzeitstabilität, wodurch sie sich für Anwendungen in hochpräzisen und dynamischen Umgebungen eignen. Die Legierungen werden im Metallspritzgussverfahren (MIM) oder durch Präzisionspulvermetallurgie hergestellt, kombiniert mit Präzisionsbearbeitung und Oberflächenbehandlung, um die Anforderungen von MEMS an Miniaturisierung und hochpräzise Fertigung zu erfüllen.

### 6.3.1 Trägheitssensor-Gegengewicht

Das Trägheitssensor-Gegengewicht ist eine Kernkomponente von MEMS-Beschleunigungsmessern und Gyroskopen. Es dient dazu, die Trägheitseigenschaften des Sensormasseblocks anzupassen, um dessen hochempfindliche Reaktion auf Beschleunigung oder Winkelgeschwindigkeit zu gewährleisten. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen eignen sich aufgrund ihrer hohen Dichte und ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften ideal als Material für Trägheitssensor-Gegengewichte. Dank ihrer hohen Dichte bietet die Legierung ausreichend Masse auf kleinem Raum, verbessert die Empfindlichkeit und Reaktionsgenauigkeit des Sensors und eignet sich für miniaturisierte Designs wie MEMS-Sensoren für Smartphones oder tragbare Geräte. Die nichtmagnetische Eigenschaft verhindert Störungen der Sensorsignale durch Magnetfelder und gewährleistet so hochpräzise Messungen in komplexen elektromagnetischen Umgebungen (wie z. B. in der Automobilelektronik oder in Navigationssystemen der Luftfahrt). Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient der Legierung gewährleistet die Dimensionsstabilität des Gegengewichts bei Temperaturschwankungen und erhält die langfristige Zuverlässigkeit des Sensors.

Im Herstellungsprozess werden aus einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung Mikrogewichte mittels Metallspritzguss (MIM) hergestellt, um die Anforderungen von MEMS-Bauelementen an komplexe Formen und hohe Präzision zu erfüllen. Beim MIM-Verfahren werden Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver mit einem Bindemittel vermischt und nach dem Spritzguss durch Entfetten und Flüssigphasensintern eine dichte Struktur gebildet. Die Nickel-Kupfer-Flüssigphase benetzt die Wolframpartikel, reduziert die Porosität und verbessert Dichte und mechanische Eigenschaften. Präzisionsbearbeitung optimiert die Maßgenauigkeit des Gegengewichts zusätzlich auf Mikrometer-Toleranzen. Oberflächenbehandlungen (wie elektrochemisches Polieren oder PVD-Beschichtung) verbessern die Oberflächengüte, reduzieren Reibung und Wärmewiderstand und gewährleisten eine nahtlose Integration in MEMS-Strukturen. Verarbeitung und Handhabung müssen in einem Reinraum erfolgen, um Staubkontamination zu vermeiden, die die Leistung der Mikrokomponenten beeinträchtigt.

In Trägheitssensoranwendungen verbessern Wolfram-Nickel-Kupfer-Gegengewichte die Geräteleistung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

deutlich. Beispielsweise verbessern hochdichte Gegengewichte in Smartphone-Beschleunigungssensoren die Empfindlichkeit der Bewegungserkennung, und ihre nichtmagnetischen Eigenschaften gewährleisten einen stabilen Betrieb in Umgebungen mit elektromagnetischen Störungen. In Airbagsystemen von Autos gewährleisten die Dimensionsstabilität und Wärmeleitfähigkeit der Gegengewichte die Zuverlässigkeit der Sensoren bei extremen Temperaturen. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Optimierung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, die Verwendung von Mikrostrukturdesigns (wie porösen Gegengewichten) zur Gewichtsreduzierung bei gleichbleibender Trägheit oder die Kombination additiver Fertigungstechnologien zur Erzielung einer präziseren Miniaturisierung. Die Qualitätskontrolle überprüft die Leistung der Gegengewichte durch Dichtemessung, Magnetisierungsstärkeprüfung und Vibrationstests, um die Einhaltung von MEMS-Standards (wie ISO 16063) sicherzustellen. Da sich MEMS-Sensoren in Zukunft in Richtung höherer Empfindlichkeit und Miniaturisierung entwickeln, können Wolfram-Nickel-Kupfer-Gegengewichte die Leistung durch die Integration von Nanomaterialien weiter optimieren.

### 6.3.2 Mikrowaagenkomponenten

Mikrobalancierte Komponenten sind Schlüsselkomponenten in MEMS-Aktuatoren, Oszillatoren oder Mikrosiegeln. Sie werden verwendet, um das dynamische Gleichgewicht und die Schwerpunktverteilung mikromechanischer Strukturen anzupassen und so deren Stabilität bei hochfrequenten Vibrationen oder schnellen Bewegungen zu gewährleisten. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen sind aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten die bevorzugten Materialien für mikrobalancierte Komponenten. Dank ihrer hohen Dichte kann die Legierung ausreichend Masse auf kleinem Raum bereitstellen, die die Schwerpunktlage von MEMS-Geräten (wie optischen Mikrosiegeln oder Mikrogyroskopen) optimieren und Vibrationsversatz oder mechanische Resonanz reduzieren. Die nichtmagnetische Eigenschaft vermeidet elektromagnetische Störungen und eignet sich für hochpräzise optische Geräte oder Kommunikationsgeräte. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die geometrische Stabilität der Komponenten bei Temperaturschwankungen und erhält die Betriebsgenauigkeit der MEMS-Struktur.

Im Herstellungsprozess werden Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen verwendet, um mikroausgeglichene Komponenten mittels MIM (Mikropulvermetallurgie) herzustellen, um den Anforderungen an komplexe Formen und Mikrometergenaue Präzision gerecht zu werden. Das MIM-Verfahren formt winzige Blöcke im Spritzgussverfahren. Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen erhöhen die Dichte zusätzlich, eliminieren Mikroporen und verbessern die mechanischen Eigenschaften sowie die Wärmeleitfähigkeit. Durch Präzisionsbearbeitung (wie Lasermikrobearbeitung oder Elektrofunktensbearbeitung) werden hochpräzise geometrische Formen mit Mikrometergenauen Toleranzen erzielt, die sich für die winzigen Strukturen von MEMS-Oszillatoren eignen. Oberflächenbehandlungen (wie DLC-Beschichtung oder chemische Passivierung) verbessern die Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit und verlängern die Lebensdauer der Komponenten in dynamischen Umgebungen. Der Verarbeitungsprozess muss in einer hochreinen Umgebung durchgeführt

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

werden, um zu verhindern, dass Staub die Leistung der Mikrokomponenten beeinträchtigt.

In MEMS-Anwendungen verbessern mikrobalancierte Wolfram-Nickel-Kupfer-Komponenten die Geräteleistung deutlich. Beispielsweise optimieren hochdichte Ausgleichskomponenten bei Laser-Scanning-Mikrospiegeln die Schwerpunktverteilung des Oszillators und verbessern Scangenauigkeit und -geschwindigkeit. Bei Mikrogyroskopen sorgen Nichtmagnetizität und niedrige Wärmeausdehnungskoeffizienten für hohe Empfindlichkeit und Anpassungsfähigkeit an Umgebungsbedingungen. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Reduzierung der Masse durch Mikrostrukturdesign (z. B. Hohlstrukturen), den Einsatz von Nanobeschichtungen zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften oder die Kombination von 3D-Drucktechnologie zur schnellen Anpassung komplexer Formen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Komponentenleistung durch CMM-Messungen der Maßgenauigkeit, Wärmeleitfähigkeitsprüfungen und elektromagnetische Abschirmungstests, um die Einhaltung von MEMS-Standards (z. B. IEEE 1833) sicherzustellen.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### 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 Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in Energie und Industrie

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen bieten aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften, ihrer hervorragenden Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ein hervorragendes Anwendungspotenzial im Energie- und Industriebereich, insbesondere in anspruchsvollen Anwendungsbereichen wie Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, der Luft- und Raumfahrt sowie Industrieanlagen. Die pulvermetallurgisch hergestellte Legierung kombiniert die hohe Dichte von Wolfram mit der Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase und erfüllt so die strengen Anforderungen von Energieanlagen an Wärmemanagement, Gewichtsausgleich und elektromagnetische Verträglichkeit. Mit der weltweit steigenden Nachfrage nach sauberer Energie und effizienter Industrietechnologie gewinnt die Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen im Bereich der Fahrzeuge mit alternativen Antrieben zunehmend an Bedeutung, insbesondere bei Gegengewichten von Motorrotoren und Wärmeableitungssubstraten für Batteriepacks.

### 7.1 Bereich der Fahrzeuge mit neuer Energie

Mit alternativen Antrieben betriebene Fahrzeuge (einschließlich reiner Elektrofahrzeuge und Hybridfahrzeuge) sind auf effiziente Motorsysteme und Batteriemanagementsysteme angewiesen und stellen hohe Anforderungen an die Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Nichtmagnetisierung und Dimensionsstabilität der Materialien. Eine Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung hat sich aufgrund ihrer einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften zu einem idealen Material für Schlüsselkomponenten in Motor- und Batteriesystemen entwickelt. Die hohe Dichte ermöglicht einen präzisen Gewichtsausgleich und optimiert das dynamische Gleichgewicht des Motorrotors. Die hohe Wärmeleitfähigkeit und der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient unterstützen das Wärmemanagement des Batteriesystems und gewährleisten Betriebsstabilität und -sicherheit. Die Nichtmagnetisierung vermeidet elektromagnetische Störungen und gewährleistet die Leistung des Motors und des elektronischen Systems. Die Legierung wird durch Flüssigphasensintern, heißisostatisches Pressen und Präzisionsbearbeitungsverfahren hergestellt, um den Anforderungen von mit alternativen Antrieben betriebenen Fahrzeugen an hohe Präzision und Haltbarkeit gerecht zu werden.

#### 7.1.1 Rotorgewicht des Motors

Das Gegengewicht des Motorrotors ist eine zentrale Komponente im Antriebssystem von Fahrzeugen mit alternativem Antrieb. Es dient der Anpassung der Schwerpunktverteilung des Rotors, der Sicherstellung des dynamischen Gleichgewichts des Motors bei hohen Drehzahlen, der Reduzierung von Vibrationen und Geräuschen sowie der Verbesserung von Effizienz und Lebensdauer. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen werden aufgrund ihrer hohen Dichte und ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften bevorzugt für Motorrotor-Gegengewichte verwendet. Die hohe Dichte ermöglicht es der Legierung, ausreichend Masse in einem begrenzten Volumen bereitzustellen, die Schwerpunktklage des Rotors präzise zu steuern, exzentrische Vibrationen bei hohen Drehzahlen zu reduzieren und die Lebensdauer des Motorlagers zu verlängern. Die nichtmagnetische Eigenschaft verhindert Magnetfeldstörungen und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gewährleistet den stabilen Betrieb des Motors in hochfrequenten elektromagnetischen Umgebungen. Es eignet sich besonders für Permanentmagnet-Synchronmotoren und Induktionsmotoren. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient der Legierung gewährleistet die Dimensionsstabilität des Gegengewichts bei betriebsbedingten Temperaturanstiegen und die präzise Rotorbalance. Im Herstellungsprozess werden Gegengewichtskomponenten aus einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung mittels Metallspritzguss oder Pulvermetallurgie hergestellt, um den Designanforderungen komplexer Formen und Miniaturisierung gerecht zu werden. Die MIM-Technologie erzeugt eine hochdichte Struktur durch Mischen von Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver mit einem Bindemittel, Entfetten und Flüssigphasensintern nach dem Spritzguss. Die Nickel-Kupfer-Flüssigphase benetzt die Wolframpartikel und verbessert so die mechanischen Eigenschaften und die Wärmeleitfähigkeit. Heißisostatisches Pressen beseitigt zusätzlich Mikroporen, verbessert die Dichte und Festigkeit des Gegengewichts und eignet sich für Hochleistungsmotoren. Durch Präzisionsbearbeitung werden Toleranzen im Mikrometerbereich erreicht, um eine exakte Abstimmung von Gegengewicht und Rotor zu gewährleisten. Die Oberflächenbehandlung verbessert die Korrosionsbeständigkeit und Oberflächengüte und reduziert Reibung und Verschleiß.

In Fahrzeugen mit alternativer Antriebstechnologie verbessern Rotorgewichte aus Wolfram-Nickel-Kupfer die Leistung des Antriebssystems deutlich. Beispielsweise reduzieren hochdichte Gewichte bei Hauptantriebsmotoren von Elektrofahrzeugen Vibrationen und Geräusche und verbessern die Leistungseffizienz. In Hybridfahrzeug-Motorsystemen vermeiden nichtmagnetische Gewichte elektromagnetische Störungen und verbessern die Regelgenauigkeit. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Optimierung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, die Reduzierung der Masse durch leichte Mikrostrukturkonstruktionen (z. B. Hohlgehäuse) oder die Kombination additiver Fertigungstechnologien zur Anpassung komplexer Formen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Gewichtsleistung durch Dichtemessung, Vibrationstests und Magnetisierungsstärkeprüfungen, um die Einhaltung der Automobilindustriestandards zu gewährleisten.

### 7.1.2 Wärmeableitungssubstrat des Batteriepacks

Das Wärmeableitungssubstrat des Batteriepacks ist eine Schlüsselkomponente im Batteriemanagementsystem von Elektrofahrzeugen. Es dient dazu, die hohe Wärmeentwicklung der Batterie während des Betriebs schnell abzuleiten und so zu verhindern, dass Überhitzung zu Leistungseinbußen oder Sicherheitsrisiken führt. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen eignen sich aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ideal als Wärmeableitungssubstrat für Batteriepacks. Die hohe Wärmeleitfähigkeit beruht auf der schnellen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer, das die von der Batterie (z. B. Lithium-Ionen-Batterien) erzeugte Wärme schnell an das Wärmeableitungssystem ableiten und so die optimale Betriebstemperatur der Batterie aufrechterhalten kann. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient entspricht den Wärmeausdehnungseigenschaften von Batteriematerialien (wie Graphit- oder Keramikmembranen), reduziert Verformungen oder Risse durch thermische Belastung und gewährleistet die strukturelle Stabilität des Batteriepacks. Die nichtmagnetische Eigenschaft vermeidet elektromagnetische Störungen und eignet sich für den Einsatz in der Nähe der elektronischen Steuereinheit (ECU) im

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Batteriemanagementsystem.

Während des Herstellungsprozesses werden aus Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen mittels Pulvermetallurgie oder MIM-Technologie Wärmeableitungssubstrate hergestellt, um die Anforderungen des Batteriepacks an dünnwandige, hochpräzise Strukturen zu erfüllen. Flüssigphasensintern bildet eine dichte Mikrostruktur mit gleichmäßig verteilten Nickel-Kupfer-Bindungsphasen, die die Wärmeleitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften verbessern. Heißisostatisches Pressen beseitigt Restporosität, verbessert die Dichte und Haltbarkeit des Substrats und eignet sich für Hochleistungsbatterieanwendungen. Durch Präzisionsbearbeitung (wie Mikrofräsen oder Laserbearbeitung) werden komplexe Wärmeableitungskanäle oder dünne Plattenstrukturen realisiert, um einen engen Kontakt mit dem Batteriemodul zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen (wie PVD-TiN-Beschichtung oder chemische Passivierung) verbessern die Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit und verlängern die Lebensdauer des Substrats in feuchten oder heißen Umgebungen. Die Verarbeitung muss in einem Reinraum erfolgen, um Staubbelastung zu vermeiden, die die Wärmeleitfähigkeit beeinträchtigt.

In Fahrzeugen mit alternativer Antriebstechnologie verbessern Wärmeableitungssubstrate aus Wolfram-Nickel-Kupfer die Leistung des Batteriepacks deutlich. Beispielsweise reduziert die schnelle Wärmeableitung des Substrats in Hochleistungs-Elektrofahrzeugen den Temperaturanstieg der Batterie und verlängert so deren Lebensdauer und Ladeeffizienz. In kommerziellen Elektrobussen gewährleistet der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient die strukturelle Stabilität des Batteriepacks während thermischer Zyklen. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Wärmeableitungseffizienz durch Mikrokanaldesign, den Einsatz von Verbundbeschichtungen (z. B. Graphen) zur Reduzierung des Wärmewiderstands oder die Kombination von 3D-Drucktechnologie zur Anpassung komplexer Wärmeableitungsstrukturen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Substrateleistung durch Wärmeleitfähigkeitsprüfungen (Laser-Flash-Verfahren), Messung des Wärmeausdehnungskoeffizienten und Salzsprühnebeltests, um die Einhaltung der Automobilindustriestandards zu gewährleisten.

## 7.2 Industrielle Kühllösungen

Industrielle Wärmeableitungslösungen sind die Kerntechnologie für den stabilen Betrieb moderner Industrieanlagen. Sie ermöglichen ein effizientes Management der von leistungsstarken elektronischen Komponenten oder Systemen während des Betriebs erzeugten Wärme, um zu verhindern, dass Überhitzung zu Leistungseinbußen oder Geräteausfällen führt. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen eignen sich aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit, ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften ideal für industrielle Wärmeableitungskomponenten. Sie leiten Wärme schnell ab, bleiben dimensionsstabil und vermeiden elektromagnetische Störungen. Dank ihrer hohen Dichte und hervorragenden mechanischen Eigenschaften eignet sich die Legierung für den Langzeiteinsatz in rauen Umgebungen, beispielsweise in Rechenzentrumsservern, industriellen Automatisierungsgeräten und Leistungshalbleitermodulen. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen werden durch Flüssigphasensintern, heißisostatisches Pressen und Präzisionsbearbeitungsverfahren

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hergestellt, um eine dichte Mikrostruktur zu bilden, die den Anforderungen der industriellen Wärmeableitung an hohe Präzision und Langlebigkeit gerecht wird und den stabilen Betrieb leistungsstarker Industrieanlagen unterstützt.

### 7.2.1 Server-Kühlbasis

Der Serverkühlkörper ist eine Schlüsselkomponente des Rechenzentrumsservers. Er dient dazu, die hohe Wärmeentwicklung von CPU, GPU oder Speichermodul während des Betriebs schnell abzuleiten und so die Stabilität und Zuverlässigkeit des Servers auch bei hoher Belastung zu gewährleisten. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen werden aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten bevorzugt für Serverkühlkörper verwendet. Die hohe Wärmeleitfähigkeit beruht auf der schnellen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer, das die vom Prozessor erzeugte Wärme schnell an den Radiator oder das Flüssigkeitskühlsystem ableitet, die Chiptemperatur senkt und die Lebensdauer des Geräts verlängert. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient entspricht den Wärmeausdehnungseigenschaften von siliziumbasierten Chips oder Keramiksubstraten, reduziert Verformungen oder Risse durch thermische Belastung und gewährleistet die langfristige Kontaktstabilität zwischen Basis und Chip. Die nichtmagnetische Eigenschaft verhindert elektromagnetische Störungen und eignet sich für die hochdichte elektromagnetische Umgebung im Rechenzentrum.

Während des Herstellungsprozesses wird aus einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung mittels Pulvermetallurgie ein Kühlkörper hergestellt. Dabei kommt üblicherweise kaltisostatisches Pressen oder Metallspritzguss (MIM) zum Einsatz, um einen hochpräzisen Block zu formen. Durch Flüssigphasensintern benetzt die flüssige Nickel-Kupfer-Phase die Wolframpartikel und bildet so eine dichte Mikrostruktur, die die Wärmeleitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften verbessert. Heißisostatisches Pressen beseitigt Mikroporen zusätzlich, verbessert die Dichte und Haltbarkeit der Basis und eignet sich für Serveranwendungen mit hoher Belastung. Durch Präzisionsbearbeitung (z. B. CNC-Fräsen oder Laserbearbeitung) werden komplexe Wärmeableitungskanäle oder dünne Plattenstrukturen realisiert, um einen engen Kontakt mit dem Chip zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen (z. B. elektrochemisches Polieren oder PVD- TiN -Beschichtung) verbessern die Oberflächengüte und Korrosionsbeständigkeit, reduzieren den Wärmewiderstand und erhöhen die Oxidationsbeständigkeit. Die Verarbeitung muss in einem Reinraum erfolgen, um Staubkontamination zu vermeiden, die die Wärmeleitfähigkeit beeinträchtigt.

In Serveranwendungen verbessert der Wolfram-Nickel-Kupfer-Kühlkörper die Rechenzentrumsleistung deutlich. Beispielsweise reduziert die schnelle Wärmeableitung des Sockels bei Hochleistungsrechnern (HPC) den Chiptemperaturanstieg und unterstützt einen kontinuierlichen Hochlastbetrieb. Bei Cloud-Computing-Servern gewährleistet der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient die strukturelle Stabilität bei Temperaturwechseln und reduziert die Wartungskosten. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Wärmeableitungseffizienz durch Mikrokanaldesign, den Einsatz von Nanobeschichtungen (z. B. Graphen) zur Reduzierung des Wärmewiderstands oder die Kombination von 3D-Drucktechnologie zur Anpassung komplexer Wärmeableitungsstrukturen. Die Qualitätskontrolle

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

überprüft die Leistung des Sockels durch Wärmeleitfähigkeitsprüfungen (Laser-Flash-Verfahren), Messung des Wärmeausdehnungskoeffizienten und Haltbarkeitsprüfungen, um die Einhaltung von Rechenzentrumsstandards (z. B. ASHRAE) sicherzustellen.

### 7.2.2 Leistungshalbleiter-Gehäusesubstrat

Leistungshalbleiter-Gehäusesubstrate sind Kernkomponenten elektronischer Hochleistungsgeräte. Sie dienen der Chipunterstützung und der schnellen Ableitung der im Betrieb entstehenden hohen Wärme. So gewährleisten sie die Leistung und Zuverlässigkeit des Geräts in Hochspannungs- und Hochstromumgebungen. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen eignen sich aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit, ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften ideal als Substrate für Leistungshalbleiter-Gehäusesubstrate. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit ermöglicht eine schnelle Wärmeableitung von Halbleiterchips zum Wärmeableitungssystem, senkt die Sperrschichttemperatur und verbessert so die Effizienz und Lebensdauer des Geräts. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient entspricht den Wärmeausdehnungseigenschaften von Chipmaterialien ( wie Silizium oder Siliziumkarbid), reduziert thermisch bedingte Gehäuseausfälle und gewährleistet langfristige Stabilität. Die nichtmagnetischen Eigenschaften vermeiden elektromagnetische Störungen und eignen sich für hochfrequente Leistungselektronikanwendungen.

Im Herstellungsprozess werden Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen zur Herstellung von Verpackungssubstraten mittels Pulvermetallurgie oder MIM-Technologie verwendet, um den Anforderungen an dünnwandige, hochpräzise Strukturen gerecht zu werden. Flüssigphasensintern bildet eine dichte Mikrostruktur mit gleichmäßig verteilter Nickel-Kupfer-Bindungsphase, die die Wärmeleitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften verbessert. Heißisostatisches Pressen beseitigt Restporosität, verbessert die Dichte und Haltbarkeit des Substrats und eignet sich für Hochleistungsanwendungen. Durch Präzisionsbearbeitung (wie Mikrofräsen oder Elektrofunkturbearbeitung ) werden ebene Oberflächen und präzise Abmessungen mit Toleranzen im Mikrometerbereich erzielt, um eine enge Verbindung mit dem Chip zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen (wie PVD- CrN- Beschichtung oder chemische Passivierung) verbessern die Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit und verlängern die Lebensdauer des Substrats in Umgebungen mit hohen Temperaturen oder hoher Luftfeuchtigkeit. Die Substratoberfläche wird üblicherweise durch Schweißen oder wärmeleitenden Klebstoff mit dem Chip verbunden, wobei der thermische Grenzflächenwiderstand minimiert werden muss.

In Leistungshalbleiteranwendungen verbessern Wolfram-Nickel-Kupfer-Gehäusesubstrate die Geräteleistung deutlich. Beispielsweise verbessert die schnelle Wärmeableitung des Substrats in Industriewechselrichtern die Leistungsdichte und Zuverlässigkeit des IGBT-Moduls; in Windkraftwechselrichtern gewährleistet der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient die Stabilität des Gehäuses bei thermischen Zyklen. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Optimierung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, die Verwendung einer mehrschichtigen Verbundstruktur zur Verbesserung der Wärmediffusionseffizienz oder die Kombination

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

additiver Fertigungstechnologien zur Anpassung komplexer Wärmeableitungswege. Die Qualitätskontrolle überprüft die Substratleistung durch Wärmeleitfähigkeitsprüfungen, Messungen des Wärmeausdehnungskoeffizienten und Hochtemperatur-Alterungstests, um die Einhaltung von Industriestandards (wie IEC 60747) sicherzustellen.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Kapitel 8 Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in der nationalen Verteidigungsindustrie

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen haben sich aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften, ihrer hervorragenden Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten in der Landesverteidigung und der Militärindustrie bewährt, insbesondere in elektronischen Abwehrsystemen, Waffensystemen und Schutzausrüstungen. Die pulvermetallurgisch hergestellte Legierung vereint die hohe Dichte von Wolfram mit der Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase und erfüllt so die strengen Anforderungen an militärische Ausrüstung hinsichtlich Gewichtskontrolle, elektromagnetischer Verträglichkeit und Widerstandsfähigkeit gegen extreme Umgebungen. Mit den steigenden Anforderungen an Präzision, Zuverlässigkeit und Tarnung in der modernen Kriegsführung gewinnt die Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in elektronischen Abwehrsystemen, insbesondere in Störsendergewichtskomponenten und Radartäuschkörperkomponenten, zunehmend an Bedeutung.

### 8.1 Elektronische Gegenmaßnahmenausrüstung

Elektronische Gegenmaßnahmenausrüstung ist eine Kerntechnologie der modernen Landesverteidigung und Militärindustrie. Sie wird eingesetzt, um feindliche Radare, Kommunikationssysteme und Navigationsgeräte zu stören oder zu täuschen und so die Sicherheit der eigenen Truppen oder Ausrüstung zu gewährleisten. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen eignen sich aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften, ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ideal als Werkstoff für Schlüsselkomponenten in elektronischen Gegenmaßnahmenausrüstungen. Die hohe Dichte ermöglicht es, ausreichend Masse in einem begrenzten Volumen bereitzustellen und so die Gewichtsverteilung und das dynamische Gleichgewicht der Ausrüstung zu optimieren. Die nichtmagnetische Eigenschaft verhindert elektromagnetische Störungen und gewährleistet die Betriebsstabilität in hochfrequenten elektromagnetischen Umgebungen. Die hohe Wärmeleitfähigkeit und der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient unterstützen das Wärmemanagement und die Dimensionsstabilität, was sie für hochbelastbare und schnell einsetzbare militärische Szenarien geeignet macht. Die Legierung wird durch Flüssigphasensintern, heißisostatisches Pressen und Präzisionsbearbeitungsverfahren hergestellt, um eine dichte Mikrostruktur zu bilden, die die Anforderungen elektronischer Gegenmaßnahmenausrüstung an hohe Präzision und Haltbarkeit erfüllt.

#### 8.1.1 Gegenmaßnahmen und Gewichtskomponenten

Die Gegengewichtsbaugruppe des Störsenders ist eine Schlüsselkomponente elektronischer Gegenmaßnahmen. Sie dient der Justierung des Schwerpunkts des Störsenders (z. B. eines koaxialen Düppels oder eines Infrarot-Täuschkörpers), um dessen dynamische Stabilität und Flugbahngenauigkeit bei Hochgeschwindigkeitsstart und -flug zu gewährleisten. Aufgrund ihrer hohen Dichte und ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften ist eine Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung das bevorzugte Material für die Gegengewichtsbaugruppe des Störsenders. Die hohe Dichte ermöglicht es der Legierung, ausreichend Masse auf kleinem Raum bereitzustellen, den Schwerpunkt des Störsenders präzise zu

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

steuern, seine aerodynamische Leistung zu optimieren, die Flugdistanz zu verlängern oder die Zielgenauigkeit zu verbessern. Die nichtmagnetische Eigenschaft verhindert Störungen der internen elektronischen Komponenten des Störsenders (wie Sucher oder Steuerschaltung) durch das Magnetfeld und gewährleistet so den normalen Betrieb in einer komplexen elektromagnetischen Umgebung. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient der Legierung gewährleistet die Dimensionsstabilität der Gegengewichtsbaugruppe unter der durch Luftreibung oder Umgebungstemperaturunterschiede im Hochgeschwindigkeitsflug entstehenden Wärme.

Während des Herstellungsprozesses wird eine Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung verwendet, um Gegengewichtskomponenten durch Metallspritzguss (MIM) oder pulvermetallurgisches Verfahren herzustellen, um den Anforderungen von Störsendern hinsichtlich Miniaturisierung und komplexer Formen gerecht zu werden. Die MIM-Technologie bildet eine hochdichte Struktur, indem Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver mit einem Bindemittel gemischt, entfettet und nach dem Spritzgießen in der Flüssigphase gesintert werden. Die flüssige Nickel-Kupfer-Phase benetzt die Wolframpartikel, um mechanische Eigenschaften und Wärmeleitfähigkeit zu verbessern. Heißisostatisches Pressen beseitigt Mikroporen zusätzlich, verbessert Dichte und Festigkeit des Gegengewichts und eignet sich für Anwendungen mit hoher dynamischer Belastung. Durch Präzisionsbearbeitung (z. B. CNC-Fräsen oder EDM) werden Toleranzen im Mikrometerbereich erreicht, um die genaue Anpassung des Gegengewichts an die Störsenderstruktur zu gewährleisten. Eine Oberflächenbehandlung verbessert die Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit und verlängert so die Lebensdauer der Komponenten in feuchten oder heißen Umgebungen.

Bei elektronischen Gegenmaßnahmen verbessern Wolfram-Nickel-Kupfer-Gegengewichtsbaugruppen die Leistung von Störsendern deutlich. Beispielsweise optimieren hochdichte Gegengewichte bei schiffsgestützten Störsendern die Flugbahn des Raketenkörpers, um eine präzise Abdeckung des feindlichen Radarerfassungsbereichs zu gewährleisten. Bei Infrarot-Täuschbomben vermeiden nichtmagnetische Gegengewichte Störungen des elektronischen Leitsystems und verbessern den Induktionseffekt. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Optimierung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, die Reduzierung der Masse durch mikrostrukturelles Design (z. B. hohle Gegengewichte) oder die Anpassung komplexer Formen in Kombination mit additiver Fertigungstechnologie. Die Qualitätskontrolle überprüft die Leistung des Gegengewichts durch Dichtemessung, Vibrationstests und Magnetisierungsstärkeprüfungen, um die Einhaltung militärischer Standards zu gewährleisten.

### 8.1.2 Radar-Täuschkörperkomponenten

Radartäuschkörperkomponenten sind ein wichtiger Bestandteil elektronischer Gegenmaßnahmen. Sie werden verwendet, um Zielsignale zu simulieren oder feindliche Radare zu stören und so eigene Flugzeuge, Schiffe oder Bodengeräte vor Entdeckung und Angriffen zu schützen. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen sind aufgrund ihrer hohen Dichte, Nichtmagnetizität und hohen Wärmeleitfähigkeit ein ideales Material für Radartäuschkörperkomponenten. Die hohe Dichte ermöglicht es, auf kleinem Raum genügend Masse bereitzustellen, um den Radarquerschnitt (RCS) eines realen Ziels zu simulieren

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und die Täuschungswirkung des Täuschkörpers zu verstärken. Die Nichtmagnetizität verhindert Störungen der internen elektronischen Komponenten des Täuschkörpers (wie Antennen oder Signalgeneratoren) durch Magnetfelder und gewährleistet so einen stabilen Betrieb in hochfrequenten elektromagnetischen Umgebungen. Die hohe Wärmeleitfähigkeit leitet die vom Täuschkörper bei hoher Fluggeschwindigkeit oder hoher Leistung erzeugte Wärme schnell ab und verhindert so Überhitzung und Ausfälle. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die Dimensionsstabilität der Komponenten bei extremen Temperaturunterschieden.

Im Herstellungsprozess werden Komponenten für Radartäuschkörper aus einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung mittels MIM (Melting Imaging) oder Pulvermetallurgie hergestellt, um den Anforderungen an komplexe Formen und hohe Präzision gerecht zu werden. Die MIM-Technologie formt winzige Blöcke im Spritzgussverfahren. Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen verbessern die Dichte, eliminieren Mikroporen und verbessern die Wärmeleitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften. Durch Präzisionsbearbeitung (wie Laser-Mikrobearbeitung oder Elektrofunkbearbeitung) lassen sich komplexe geometrische Formen mit Toleranzen im Mikrometerbereich erzielen, die sich für die Miniaturisierung von Radartäuschkörpern eignen. Oberflächenbehandlungen (wie PVD- TiN-Beschichtung oder elektrochemisches Polieren) verbessern die Korrosionsbeständigkeit und Oberflächengüte, reduzieren die Signalstreuung und erhöhen die Oxidationsbeständigkeit. Die Bearbeitung muss in einem Reinraum erfolgen, um eine Beeinträchtigung der Bauteilleistung durch Staubbelastung zu verhindern.

Bei Radar-Täuschkörpern verbessern Wolfram-Nickel-Kupfer-Komponenten die Gegenwirkung deutlich. Beispielsweise simulieren hochdichte Komponenten bei Drohnen-Täuschkörpern den RCS realer Flugzeuge und täuschen feindliche Radare. Bei Schiffs-Täuschkörpersystemen gewährleisten nichtmagnetische Eigenschaften und eine hohe Wärmeleitfähigkeit die Stabilität und Zuverlässigkeit der Täuschkörper bei hohem Stromverbrauch. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Leitfähigkeit durch Anpassung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, den Einsatz mehrschichtiger Verbundstrukturen zur Verbesserung der elektromagnetischen Abschirmwirkung oder die Kombination von 3D-Drucktechnologie zur Herstellung komplexer Täuschkörperstrukturen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Komponentenleistung durch elektromagnetische Abschirmungstests (MIL-STD-461), Wärmeleitfähigkeitstests und Hochtemperatur-Alterungstests, um die Einhaltung militärischer Standards zu gewährleisten.

## 8.2 Munitionssystem

ein Kernbestandteil der Verteidigungsindustrie, der Materialien mit hoher Dichte zur Optimierung der Gewichtsverteilung, guten mechanischen Eigenschaften zur Beständigkeit gegen Aufpralle mit hoher Geschwindigkeit und nichtmagnetischen Eigenschaften zur Vermeidung elektromagnetischer Störungen erfordert. Eine Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist aufgrund ihrer hohen Dichte, nichtmagnetischen Eigenschaften, hohen Festigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ein ideales Material für Gegengewichts- und Ausgleichskomponenten in Munitionssystemen. Die hohe Dichte ermöglicht es, innerhalb eines begrenzten Volumens genügend Masse bereitzustellen, um die

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Flugstabilität und Durchschlagskraft der Munition zu optimieren; die nichtmagnetischen Eigenschaften stellen sicher, dass das elektronische Leitsystem der Munition nicht gestört wird; die hohe Festigkeit und Zähigkeit ermöglichen es den Komponenten, extremen mechanischen Belastungen während des Starts und des Fluges standzuhalten; der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet Dimensionsstabilität in Umgebungen mit hohen Temperaturen oder Temperaturunterschieden. Die Legierung wird durch Flüssigphasensintern, heißostatisches Pressen und Präzisionsbearbeitungsverfahren hergestellt, um eine dichte Mikrostruktur zu bilden, die die Anforderungen des Munitionssystems an hohe Präzision und Haltbarkeit erfüllt.

### 8.2.1 Gegengewicht des Projektilsprengkopfes

Das Gegengewicht eines Projektilsprengkopfes ist eine Schlüsselkomponente im Design eines Projektils. Es dient der Einstellung des Schwerpunkts des Projektils und gewährleistet dessen dynamische Stabilität und Eindringgenauigkeit beim Hochgeschwindigkeitsstart und -flug. Aufgrund ihrer hohen Dichte und ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften ist eine Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung das bevorzugte Material für das Gegengewicht eines Projektilsprengkopfes. Die hohe Dichte ermöglicht es der Legierung, ausreichend Masse innerhalb eines begrenzten Volumens bereitzustellen, den Schwerpunkt des Projektils präzise zu steuern, die aerodynamische Leistung zu optimieren, die Ablenkung während des Fluges zu reduzieren und die Treffergenauigkeit zu verbessern. Die nichtmagnetische Eigenschaft verhindert Störungen des Magnetfelds auf die elektronischen Komponenten im Projektil (wie das Leitsystem oder den Zünder) und gewährleistet so einen zuverlässigen Betrieb in einer komplexen elektromagnetischen Umgebung. Dank ihrer hohen Festigkeit und Zähigkeit hält die Legierung der enormen Aufprallkraft beim Start des Projektils und den Vibrationen während des Hochgeschwindigkeitsfluges stand. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet Dimensionsstabilität bei hohen Starttemperaturen oder unterschiedlichen Umgebungstemperaturen.

Im Herstellungsprozess werden Gegengewichte aus Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen mittels Pulvermetallurgie oder Metallspritzguss (MIM) hergestellt, um den Anforderungen an komplexe Formen und hohe Präzision für Artilleriegeschosse gerecht zu werden. Die MIM-Technologie erzeugt durch Mischen von Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver mit einem Bindemittel, Entfetten und Flüssigphasensintern nach dem Spritzguss eine hochdichte Struktur. Die Nickel-Kupfer-Flüssigphase benetzt die Wolframpartikel und verbessert so deren mechanische Eigenschaften und Wärmeleitfähigkeit. Heißostatisches Pressen beseitigt zusätzlich Mikroporen, verbessert die Dichte und Schlagfestigkeit des Gegengewichts und eignet sich für Hochleistungsartilleriegeschosse. Durch Präzisionsbearbeitung (z. B. CNC-Drehen oder Funkenerosion) werden Toleranzen im Mikrometerbereich erreicht, um die exakte Anpassung des Gegengewichts an die Gefechtskopfstruktur zu gewährleisten. Eine Oberflächenbehandlung verbessert die Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit und verlängert die Lebensdauer des Gegengewichts in feuchten oder heißen Umgebungen.

Bei Artilleriegeschossen verbessern Gegengewichte aus Wolfram-Nickel-Kupfer die Munitionsleistung deutlich. Beispielsweise optimieren hochdichte Gegengewichte bei Panzergeschossen die Flugstabilität des Gefechtskopfes und verbessern die panzerbrechende Wirkung; bei Schiffsgeschützmunition

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

vermeiden nichtmagnetische Gegengewichte Störungen durch elektronische Zünder und verbessern die Treffergenauigkeit. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Zähigkeit durch Optimierung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, die Optimierung der Schwerpunktverteilung durch Mikrostrukturdesign (z. B. Gegengewichte mit Gradientendichte) oder die Anpassung komplexer Formen in Kombination mit additiver Fertigungstechnologie. Die Qualitätskontrolle überprüft die Leistung der Gegengewichte durch Dichtemessung, Aufprallprüfungen und Magnetisierungsstärkeprüfungen, um die Einhaltung militärischer Standards zu gewährleisten.

### 8.2.2 Komponenten zur Stabilisierung des Raketensprengkopfes

Die Ausgleichskomponente des Raketensprengkopfes ist eine Schlüsselkomponente im Raketensystem. Sie dient der Anpassung der Schwerpunktverteilung des Sprengkopfes, um die Stabilität und präzise Lenkfähigkeit der Rakete bei Hochgeschwindigkeitsflügen und Manövern zu gewährleisten. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen eignen sich aufgrund ihrer hohen Dichte, Nichtmagnetizität und hohen Festigkeit ideal als Ausgleichskomponente für Raketensprengköpfe. Dank ihrer hohen Dichte bietet die Legierung ausreichend Masse auf kleinem Raum, steuert den Schwerpunkt des Sprengkopfes präzise und optimiert Flugbahn und Lagestabilität der Rakete, insbesondere bei Überschallflügen oder Flügen mit hohem Manövrieraufwand. Die Nichtmagnetizität verhindert Störungen des elektronischen Systems des Sprengkopfes (wie Radarsuchkopf oder Trägheitsnavigationssystem) durch Magnetfelder und gewährleistet so eine hochpräzise Lenkung. Dank ihrer hohen Festigkeit und Zähigkeit hält die Legierung den Stößen beim Start und extremen mechanischen Belastungen im Flug stand. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet Dimensionsstabilität auch bei hoher Temperaturreibung oder Umgebungstemperaturunterschieden.

Während des Herstellungsprozesses werden Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen mittels MIM (Münzprägung) oder Pulvermetallurgie zu ausgewogenen Komponenten verarbeitet, um den Anforderungen von Raketensprengköpfen an Miniaturisierung und komplexe Formen gerecht zu werden. Die MIM-Technologie formt winzige Blöcke im Spritzgussverfahren. Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen verbessern die Dichte, eliminieren Mikroporen und verbessern die mechanischen Eigenschaften und die Wärmeleitfähigkeit. Durch Präzisionsbearbeitung (wie Laser-Mikrobearbeitung oder Elektrofunkturbearbeitung) lassen sich komplexe geometrische Formen mit Toleranzen im Mikrometerbereich erzielen, was für die kompakte Bauweise von Sprengköpfen geeignet ist. Oberflächenbehandlungen (wie PVD- CrN- Beschichtung oder elektrochemisches Polieren) verbessern die Korrosionsbeständigkeit und Oberflächengüte, reduzieren die Auswirkungen von Luftreibungswärme und erhöhen die Oxidationsbeständigkeit. Die Bearbeitung muss in einer hochreinen Umgebung erfolgen, um zu verhindern, dass Staub die Leistung der Komponenten beeinträchtigt.

Bei Raketenanwendungen verbessern Wolfram-Nickel-Kupfer-Balancekomponenten die Leistung von Gefechtsköpfen deutlich. Beispielsweise optimieren hochdichte Balancekomponenten bei Antischiffsraketen die Schwerpunktverteilung des Gefechtskopfes und verbessern die Stabilität im Hochgeschwindigkeitsflug. Bei präzisionsgelenkten Raketen gewährleisten nichtmagnetische Eigenschaften und hohe Festigkeit die Zuverlässigkeit und Stoßfestigkeit des Leitsystems.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Anpassung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, den Einsatz mehrschichtiger Verbundstrukturen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften oder die Kombination von 3D-Drucktechnologie zur Herstellung komplexer Balancestrukturen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Komponentenleistung durch Dichtemessung, Vibrationstests und elektromagnetische Abschirmungsprüfungen, um die Einhaltung militärischer Standards zu gewährleisten.

### 8.3 Gepanzerte Schutzausrüstung

Gepanzerte Schutzausrüstung ist ein Kernbestandteil der nationalen Verteidigungsindustrie. Sie dient dem Schutz von Personen, Fahrzeugen und Einrichtungen vor Projektilen, Explosionssplintern und anderen Bedrohungen. Um ein Gleichgewicht zwischen geringem Gewicht und hoher Schutzleistung zu erreichen, sind Materialien mit hoher Dichte, hoher Festigkeit, Zähigkeit und Antimagnetismus erforderlich. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen bieten dank ihrer hohen Dichte und hervorragenden mechanischen Eigenschaften eine hohe Schlagfestigkeit. Ihre Antimagnetizität verhindert elektromagnetische Störungen und eignet sich für moderne Panzerungssysteme mit integrierter Elektronik. Ihr niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet Dimensionsstabilität bei extremen Temperaturen.

#### 8.3.1 Leichte Panzerplattenverstärkungen

Leichte Panzerplattenverstärkungen sind Schlüsselkomponenten von Panzerschutzausrüstung. Sie verbessern die ballistische Leistung von Panzerplatten bei maximaler Gewichtsreduzierung. Sie eignen sich für tragbare Schutzausrüstung (wie kugelsichere Westen) oder leicht gepanzerte Fahrzeuge. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen sind aufgrund ihrer hohen Dichte, Festigkeit und Zähigkeit die bevorzugten Materialien für leichte Panzerplattenverstärkungen. Die hohe Dichte ermöglicht es der Legierung, ausreichend Masse auf begrenztem Raum bereitzustellen, die Schlagfestigkeit der Panzerplatte zu erhöhen und die kinetische Energie von Projektilen oder Explosionsfragmenten effektiv zu absorbieren und abzuleiten. Die Zähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase macht die Legierung weniger anfällig für Sprödbrüche bei Hochgeschwindigkeitsaufprall und kann Energie durch plastische Verformung absorbieren, um die Schutzleistung zu verbessern. Die nichtmagnetische Eigenschaft verhindert Störungen durch Magnetfelder auf in Panzerplatten eingebettete elektronische Geräte (wie Kommunikations- oder Sensorsysteme) und ist somit für die komplexe elektromagnetische Umgebung moderner Schlachtfelder geeignet. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die Dimensionsstabilität der Verstärkung bei Hochtemperaturexplosionen oder Umgebungstemperaturunterschieden.

Im Herstellungsprozess werden Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen verwendet, um Bewehrungen mittels Pulvermetallurgie oder Metallspritzguss (MIM) herzustellen. Diese Bewehrungen erfüllen die Anforderungen an leichte Panzerplatten hinsichtlich komplexer Formen und geringem Gewicht. Die MIM-Technologie erzeugt durch Mischen von Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver mit einem Bindemittel, Entfetten und Flüssigphasensintern nach dem Spritzguss eine hochdichte Struktur. Die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nickel-Kupfer-Flüssigphase benetzt die Wolframpartikel und verbessert so Zähigkeit und mechanische Eigenschaften. Heißisostatisches Pressen beseitigt zusätzlich Mikroporen, verbessert Dichte und Schlagzähigkeit der Bewehrung und eignet sich für Anwendungen mit hoher dynamischer Belastung. Durch Präzisionsbearbeitung (z. B. CNC-Fräsen oder Funkenerosion) werden präzise geometrische Formen und Maßtoleranzen erreicht, um eine nahtlose Integration der Bewehrungen in die Panzerplatten zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen (z. B. PVD- TiN- Beschichtung oder chemische Passivierung) verbessern die Korrosions- und Verschleißfestigkeit und verlängern so die Lebensdauer der Bewehrungen in rauen Umgebungen.

In Panzerungsanwendungen verbessern Wolfram-Nickel-Kupfer-Verstärkungen die Schutzleistung leichter Panzerplatten deutlich. Beispielsweise verbessern Verstärkungen bei kugelsicheren Westen die Widerstandsfähigkeit gegen panzerbrechende Geschosse bei gleichzeitig geringem Gewicht und erhöhter Soldatenmobilität; bei leicht gepanzerten Fahrzeugen optimieren hochdichte Verstärkungen die Schlagfestigkeit von Panzerplatten. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Zähigkeit durch Optimierung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, den Einsatz von Verbundstrukturen (z. B. in Kombination mit Keramik) zur Verbesserung der Schutzwirkung oder die Kombination additiver Fertigungsverfahren zur individuellen Anpassung komplexer Verstärkungen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Leistung der Verstärkungen durch Dichtemessung, Aufprallprüfungen und elektromagnetische Abschirmungstests, um die Einhaltung militärischer Standards zu gewährleisten.

### 8.3.2 Schutzverkleidung für gepanzerte Fahrzeuge

Die Schutzauskleidung gepanzerter Fahrzeuge ist ein wichtiges Schutzelement im Fahrzeuginneren. Sie absorbiert und verteilt die Energie von Explosionsstoßwellen, Projektilen oder Splintern und schützt so Insassen und wichtige Ausrüstung vor Schäden. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen haben sich aufgrund ihrer hohen Dichte, Festigkeit und Antimagnetizität zum bevorzugten Material für Schutzauskleidungen gepanzerter Fahrzeuge entwickelt. Dank ihrer hohen Dichte absorbiert die Legierung effektiv Aufprallenergie, reduziert das Durchschlagsvermögen von Explosionen oder Projektilen und verbessert die Schutzwirkung des Fahrzeugs. Die hohe Zähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase ermöglicht der Auskleidung, bei Hochgeschwindigkeitsaufprall Energie durch plastische Verformung zu absorbieren, Sprödbruch zu vermeiden und die Widerstandsfähigkeit gegen Mehrfachaufprall zu verbessern. Die Antimagnetizität stellt sicher, dass die Auskleidung die elektronischen Systeme im Fahrzeug (wie Navigations- oder Kommunikationsgeräte) nicht stört, was sie für moderne intelligente gepanzerte Fahrzeuge geeignet macht. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die Dimensionsstabilität der Auskleidung bei Explosionen mit hohen Temperaturen oder Umgebungstemperaturunterschieden und erhält die Integrität der Schutzstruktur.

Im Herstellungsprozess werden Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen mittels Pulvermetallurgie oder MIM-Technologie zur Herstellung von Schutzauskleidungen verwendet, um den Anforderungen gepanzerter Fahrzeuge an komplexe Formen und geringes Gewicht gerecht zu werden. Flüssigphasensintern bildet eine dichte Mikrostruktur, und die Nickel-Kupfer-Flüssigphase benetzt die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframpartikel, wodurch die mechanischen Eigenschaften und die Wärmeleitfähigkeit verbessert werden. Heißisostatisches Pressen beseitigt Mikroporen, verbessert die Dichte und Schlagfestigkeit der Auskleidung und eignet sich für hochintensive Schutzanwendungen. Durch Präzisionsbearbeitung (z. B. CNC-Schleifen oder Laserbearbeitung) werden komplexe geometrische Formen erzielt, und die Toleranz wird im Mikrometerbereich kontrolliert, um die präzise Anpassung der Auskleidung an die Fahrzeugstruktur zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen (z. B. PVD- CrN- Beschichtung oder chemische Passivierung) verbessern die Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit und verlängern die Lebensdauer der Auskleidung in feuchten oder heißen Umgebungen. Die Bearbeitung muss in einer hochreinen Umgebung erfolgen, um eine Beeinträchtigung der Leistung durch Staubbelastung zu vermeiden. Bei gepanzerten Fahrzeugen verbessern Schutzauskleidungen aus Wolfram-Nickel-Kupfer die Schutzleistung deutlich. Beispielsweise absorbieren hochdichte Auskleidungen in Kampfpanzern effektiv die Aufprallenergie von Explosionen und schützen die Insassen; in gepanzerten Mannschaftstransportwagen gewährleisten nichtmagnetische Auskleidungen den stabilen Betrieb elektronischer Geräte. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Energieabsorptionseffizienz durch Mikrostrukturdesign (z. B. Auskleidung mit Dichtegradienten), den Einsatz von Verbundbeschichtungen zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit oder die Kombination von 3D-Drucktechnologie zur Herstellung maßgeschneiderter Auskleidungsstrukturen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Leistung der Auskleidung durch Dichtemessung, Aufprallprüfungen und Hochtemperatur-Alterungstests, um die Einhaltung militärischer Standards zu gewährleisten.

## 8.4 Weltraumwaffen

Zu Weltraumwaffen zählen Systeme wie Raketen, Flugkörper und Raumfahrzeuge, die Materialien mit hoher Dichte zur Optimierung der Gewichtsverteilung, ausgezeichneter Wärmeleitfähigkeit und hoher Temperaturbeständigkeit zur Beständigkeit gegen extreme Temperaturen, nichtmagnetischen Eigenschaften zur Vermeidung elektromagnetischer Störungen und einem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten zur Gewährleistung der Dimensionsstabilität erfordern. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen haben sich aufgrund ihrer einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften zu einem idealen Material für Schlüsselkomponenten von Luft- und Raumfahrtwaffen entwickelt. Die hohe Dichte ermöglicht es, ausreichend Masse innerhalb eines begrenzten Volumens bereitzustellen und so die Schwerpunktverteilung und das dynamische Gleichgewicht des Systems zu optimieren. Hohe Wärmeleitfähigkeit und hohe Temperaturbeständigkeit unterstützen die Leistung von Komponenten in Umgebungen mit hohem Wärmefluss. Nichtmagnetische Eigenschaften vermeiden Störungen elektronischer Präzisionssysteme. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet geometrische Stabilität bei extremen Temperaturen. Die Legierung wird durch Flüssigphasensintern, heißisostatisches Pressen und Präzisionsbearbeitungsverfahren hergestellt, um eine dichte Mikrostruktur zu bilden, die den Anforderungen von Luft- und Raumfahrtwaffen an hohe Präzision und Haltbarkeit gerecht wird.

### 8.4.1 Düsenkomponenten eines Raketentriebwerks

Düsenkomponenten von Raketentriebwerken sind Kernkomponenten von Luft- und Raumfahrtwaffen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sie dienen der Führung und Beschleunigung von Hochtemperatur- und Hochdruckgasen, um eine effiziente Raketenschubabgabe zu gewährleisten. Dabei müssen sie extrem hohen Temperaturen, Thermoschocks und mechanischen Belastungen standhalten. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen sind aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit, hohen Temperaturbeständigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten die bevorzugten Werkstoffe für Düsenkomponenten (wie z. B. Düsenauskleidungen oder Düsenverlängerungen). Die hohe Wärmeleitfähigkeit beruht auf der schnellen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer, das die Wärme der Düse bei hohen Temperaturen in der Brennkammer schnell ableiten und so lokale Überhitzung und Materialversagen verhindern kann. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die geometrische Stabilität der Düse bei drastischen Temperaturunterschieden, sorgt für eine präzise Führung des Gasstroms und verbessert die Schubeffizienz. Die hohe Dichte und Zähigkeit der Legierung ermöglichen es ihr, den Reibungskräften und Vibrationen des Hochgeschwindigkeitsgasstroms standzuhalten. Die Plastizität der Nickel-Kupfer-Bindungsphase absorbiert Thermoschockenergie und verhindert so Sprödbruch. Die nichtmagnetischen Eigenschaften stellen sicher, dass es zu keinen Störungen der elektronischen Komponenten des Raketennavigations- oder -steuerungssystems kommt.

Im Herstellungsprozess werden Düsenkomponenten aus Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen mittels Pulvermetallurgie oder Metallspritzguss (MIM) hergestellt, um den Anforderungen an komplexe Formen und hohe Präzision gerecht zu werden. Flüssigphasensintern bildet eine dichte Mikrostruktur, und die flüssige Nickel-Kupfer-Phase benetzt die Wolframpartikel, wodurch die Wärmeleitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften verbessert werden. Heißisostatisches Pressen beseitigt Mikroporen, verbessert die Dichte und Temperaturbeständigkeit der Komponenten und eignet sich für Umgebungen mit hohem Wärmefluss. Präzisionsbearbeitung (z. B. CNC-Schleifen oder Funkenerosion) ermöglicht komplexe geometrische Formen mit  $\mu\text{m}$ -Toleranzen, um die aerodynamische Leistung der Düse zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen (z. B. PVD -CrN -Beschichtung oder chemische Passivierung) verbessern die Oxidations- und Erosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen und verlängern die Lebensdauer der Komponenten in extremen Umgebungen. Die Bearbeitung muss in einer Umgebung mit hoher Reinheit erfolgen, um eine Beeinträchtigung der Leistung durch Staubbelastung zu verhindern. Im Bereich der Luft- und Raumfahrt verbessern Wolfram-Nickel-Kupfer-Düsenkomponenten die Leistung von Raketentriebwerken erheblich. Beispielsweise sorgen Düsenkomponenten mit hoher Wärmeleitfähigkeit bei Feststoffraketen für eine effektive Steuerung des Hochtemperaturgasstroms und verlängern die Lebensdauer. Bei Flüssigkeitsraketen gewährleisten niedrige Wärmeausdehnungskoeffizienten die geometrische Stabilität der Düse während thermischer Zyklen. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Optimierung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, den Einsatz von Verbundbeschichtungen zur Verbesserung der Hochtemperaturbeständigkeit oder die Kombination von 3D-Drucktechnologie zur Herstellung komplexer Düsenstrukturen.

#### 8.4.2 Gegengewichte zur Lageregelung von Raumfahrzeugen

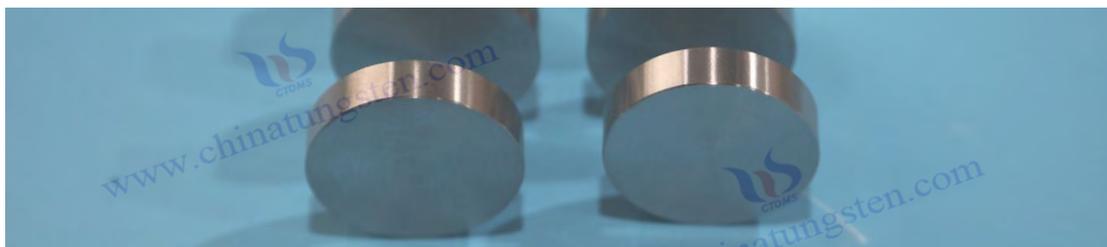
Gegengewichte zur Lageregelung von Raumfahrzeugen sind Schlüsselkomponenten von Weltraumwaffen und Satellitensystemen. Sie dienen der Anpassung der Schwerpunktverteilung von

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Raumfahrzeugen, um deren Lagestabilität und präzise Steuerung während des Orbitalbetriebs oder Manövers zu gewährleisten. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ein ideales Material für Gegengewichte zur Lageregelung. Die hohe Dichte ermöglicht es der Legierung, ausreichend Masse auf kleinem Raum bereitzustellen, den Schwerpunkt des Raumfahrzeugs präzise zu steuern, die Effizienz der Lageregelung zu optimieren und den Treibstoffverbrauch zu senken. Die nichtmagnetische Eigenschaft verhindert Störungen des Navigationssystems des Raumfahrzeugs (wie Sternensensoren oder Gyroskopen) durch Magnetfelder und gewährleistet so eine hochpräzise Lageregelung. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die Dimensionsstabilität des Gegengewichts bei extremen Temperaturunterschieden im Weltraum und hält das dynamische Gleichgewicht des Raumfahrzeugs aufrecht.

Im Herstellungsprozess werden Gegengewichte aus Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen mittels MIM (pulvermetallurgisches Verfahren) hergestellt, um den Anforderungen von Raumfahrzeugen an Miniaturisierung und komplexe Formen gerecht zu werden. Die MIM-Technologie formt winzige Blöcke im Spritzgussverfahren. Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen verbessern die Dichte, eliminieren Mikroporen und verbessern die mechanischen Eigenschaften sowie die Wärmeleitfähigkeit. Durch Präzisionsbearbeitung (z. B. Laser-Mikrobearbeitung oder Elektroofenbearbeitung) lassen sich komplexe geometrische Formen mit Toleranzen im Mikrometerbereich erzielen, was für die kompakte Bauweise von Raumfahrzeugen geeignet ist. Die Oberflächenbehandlung verbessert die Korrosionsbeständigkeit und Oberflächengüte und reduziert Partikelverunreinigungen sowie Strahlungseinflüsse im Weltraum. Die Bearbeitung muss in einer hochreinen Umgebung erfolgen, um zu verhindern, dass Staubverunreinigungen die Leistung der Komponenten beeinträchtigen.

In der Raumfahrt verbessern Gegengewichte aus Wolfram-Nickel-Kupfer die Leistung der Lageregelung deutlich. Beispielsweise optimieren hochdichte Gegengewichte bei militärischen Aufklärungssatelliten die Schwerpunktverteilung und verbessern die Reaktionsgeschwindigkeit der Lageregelung; in Raketenabwehrsystemen gewährleisten nichtmagnetische Gegengewichte den stabilen Betrieb von Navigationssystemen. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Reduzierung der Masse durch Mikrostrukturdesign, den Einsatz strahlungsresistenter Beschichtungen zur Verbesserung der Anpassungsfähigkeit an Weltraumbedingungen oder die Kombination additiver Fertigungstechnologien zur Herstellung maßgeschneiderter Gegengewichtsstrukturen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Leistung der Gegengewichte durch Dichtemessung, Vibrationstests und Magnetisierungsstärkeprüfungen, um die Einhaltung der Luft- und Raumfahrtstandards sicherzustellen.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

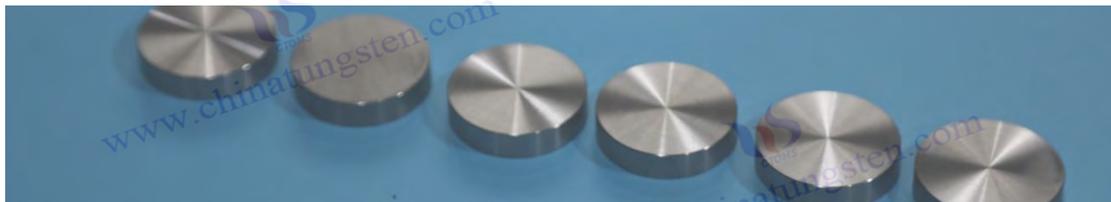
#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Kapitel 9 Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen im medizinischen Bereich

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen haben sich aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften, ihrer hervorragenden Wärmeleitfähigkeit und ihrer guten Biokompatibilität im medizinischen Bereich bewährt, insbesondere in Strahlentherapiegeräten, bildgebenden Geräten und chirurgischen Instrumenten. Die pulvermetallurgisch hergestellte Legierung kombiniert die hohe Dichte von Wolfram mit der Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase und erfüllt die strengen Anforderungen medizinischer Geräte an Strahlenschutz, Wärmemanagement und elektromagnetische Verträglichkeit. Mit der Entwicklung der Präzisionsmedizin und nicht-invasiver Behandlungstechnologien gewinnt der Einsatz von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in Strahlentherapiegeräten zunehmend an Bedeutung.

### 9.1 Strahlentherapiegeräte

Strahlentherapiegeräte (wie Linearbeschleuniger und Gamma- Knife) sind eine Kerntechnologie der modernen Medizin zur Krebsbehandlung. Sie steuern hochenergetische Strahlen (wie Röntgen- oder Gammastrahlen) präzise, um Tumorgewebe gezielt zu behandeln und gleichzeitig das umliegende gesunde Gewebe zu schützen. Diese Art von Geräten stellt extrem hohe Anforderungen an die Materialien: Sie erfordern eine hohe Dichte zur effektiven Abschirmung der Strahlung, nichtmagnetische Eigenschaften zur Vermeidung von Störungen präziser elektronischer Systeme, eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit zur Beherrschung der im Betrieb entstehenden Wärme und eine gute Biokompatibilität zur Gewährleistung der Sicherheit. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen absorbieren und schirmen Strahlung effektiv ab und schützen Patienten und medizinisches Personal dank ihrer hohen Dichte und nichtmagnetischen Eigenschaften. Ihre hohe Wärmeleitfähigkeit und ihr niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient unterstützen das Wärmemanagement und die Dimensionsstabilität der Geräte bei hohem Stromverbrauch. Die Zähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase erhöht die Haltbarkeit der Komponenten. Die Legierung wird durch Flüssigphasensintern, heißisostatisches Pressen und Präzisionsbearbeitungsverfahren hergestellt, um eine dichte Mikrostruktur zu bilden, die den Anforderungen medizinischer Geräte an hohe Präzision und Zuverlässigkeit gerecht wird.

#### 9.1.1 Strahlentherapie-Abschirmung

Abschirmkomponenten für die Strahlentherapie sind zentrale Bestandteile von Strahlentherapiegeräten. Sie dienen der Abschirmung und Begrenzung energiereicher Strahlen, stellen sicher, dass die Strahlung nur auf den Zielbehandlungsbereich einwirkt, und schützen gesundes Gewebe des Patienten sowie medizinisches Personal vor unnötiger Strahlenbelastung. Eine Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist aufgrund ihrer hohen Dichte und nichtmagnetischen Eigenschaften ein ideales Material für Abschirmkomponenten für die Strahlentherapie. Durch die hohe Dichte werden Röntgen- und Gammastrahlen wirksam absorbiert, Strahlungslecks deutlich reduziert und eine hervorragende Abschirmwirkung erzielt. Wolfram ist leichter und umweltfreundlicher als herkömmliche Bleimaterialien. Die nichtmagnetische Eigenschaft verhindert Störungen der Präzisionselektronik in Strahlentherapiegeräten (wie etwa Magnetresonanz-Führungssystemen) durch Magnetfelder und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gewährleistet so die Behandlungspräzision. Die hohe Wärmeleitfähigkeit leitet die während des Betriebs entstehende Wärme schnell ab und verhindert so eine Überhitzung der Abschirmabdeckung und damit verbundene Beeinträchtigung der Geräteleistung. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die Dimensionsstabilität der Komponente während thermischer Zyklen und erhält die Genauigkeit der Abschirmstruktur.

Im Herstellungsprozess werden Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen verwendet, um Schildkomponenten mittels Pulvermetallurgie oder Metallspritzguss (MIM) herzustellen und so den Anforderungen an komplexe Formen und hohe Präzision gerecht zu werden. Die MIM-Technologie erzeugt eine hochdichte Struktur durch Mischen von Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver mit einem Bindemittel, Entfetten und Flüssigphasensintern nach dem Spritzguss. Die Nickel-Kupfer-Flüssigphase benetzt die Wolframpartikel und verbessert so die mechanischen Eigenschaften und die Wärmeleitfähigkeit. Heißisostatisches Pressen beseitigt zusätzlich Mikroporen, verbessert die Dichte und das Strahlungsabsorptionsvermögen des Schildes und eignet sich für Anwendungen in der Hochenergie-Strahlentherapie. Präzisionsbearbeitung (z. B. CNC-Fräsen oder Elektrofunktionsbearbeitung) ermöglicht komplexe Geometrien mit  $\mu\text{m}$ -Toleranzen, um eine nahtlose Integration in Strahlentherapiegeräte zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen (z. B. elektrochemisches Polieren oder chemische Passivierung) verbessern die Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität und verhindern Erosion in Oxidations- oder Sterilisationsumgebungen bei Langzeitanwendung.

In der Strahlentherapie verbessern Wolfram-Nickel-Kupfer-Abschirmkomponenten die Behandlungssicherheit und -präzision deutlich. Beispielsweise begrenzt eine hochdichte Abschirmung in Linearbeschleunigern die Strahlenstreuung effektiv und schützt das gesunde Gewebe der Patienten. In Gamma-Knife-Geräten gewährleistet eine nichtmagnetische Abschirmung die elektromagnetische Verträglichkeit des Behandlungssystems. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Optimierung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, den Einsatz von Verbundbeschichtungen (wie DLC) zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit oder die Kombination von 3D-Drucktechnologie zur Herstellung maßgeschneiderter Abschirmstrukturen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Komponentenleistung durch Strahlenschutzprüfungen, Wärmeleitfähigkeitsprüfungen und Biokompatibilitätstests (ISO 10993).

### 9.1.2 Strahlungskollimatorkomponenten

Der Strahlenkollimator ist ein Kernbestandteil von Strahlentherapiegeräten. Er dient der präzisen Steuerung von Strahlungsrichtung und -reichweite, stellt die Fokussierung der energiereichen Strahlung auf das Tumorgewebe sicher und minimiert Schäden am umliegenden gesunden Gewebe. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen werden aufgrund ihrer hohen Dichte, Nichtmagnetizität und hohen Wärmeleitfähigkeit bevorzugt für Strahlenkollimatorkomponenten verwendet. Die hohe Dichte ermöglicht die effektive Absorption und Abschirmung von Streustrahlung, die präzise Strahlformung und eine optimierte Behandlungsausrichtung. Die Nichtmagnetizität verhindert Störungen des Magnetfelds auf die elektronische Steuerung (wie Servomotoren oder Sensoren) in der Nähe des Kollimators und gewährleistet so die dynamische Strahleinstellung. Die hohe Wärmeleitfähigkeit leitet die vom

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kollimator durch die energiereiche Strahlung erzeugte Wärme schnell ab und verhindert so Verformungen durch Überhitzung. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die Dimensionsstabilität der Komponente während thermischer Zyklen und die Kollimationsgenauigkeit.

Während des Herstellungsprozesses werden Kollimatorkomponenten aus einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung mittels MIM (Melting Imaging) oder Pulvermetallurgie hergestellt, um den Anforderungen an komplexe Formen und mikrometeregenaue Präzision gerecht zu werden. Die MIM-Technologie formt winzige Blöcke im Spritzgussverfahren. Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen verbessern die Dichte, eliminieren Mikroporen und verbessern die Strahlenabschirmung und die mechanischen Eigenschaften. Durch Präzisionsbearbeitung (wie Laser-Mikrobearbeitung oder Elektrofunktens-Bearbeitung) werden komplexe Geometrien wie die Dünnschichtstruktur des Mehrlamellenkollimators (MLC) realisiert. Dabei werden die Toleranzen im Mikrometerbereich kontrolliert, um eine präzise Strahlführung zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen (wie PVD- TiN- Beschichtung oder elektrochemisches Polieren) verbessern die Korrosionsbeständigkeit und Oberflächenbeschaffenheit, reduzieren die Strahlungsstreuung und erhöhen die Oxidationsbeständigkeit. Die Bearbeitung muss in einer hochreinen Umgebung erfolgen, um zu verhindern, dass Staub die Leistung der Komponenten beeinträchtigt.

In der Strahlentherapie verbessern Wolfram-Nickel-Kupfer-Kollimatorkomponenten die Behandlungsgenauigkeit und -sicherheit deutlich. Beispielsweise formen hochdichte Kollimatoren in der intensitätsmodulierten Strahlentherapie (IMRT) den Strahl präzise und zielen auf komplex geformte Tumore; in Protonentherapiegeräten gewährleisten nichtmagnetische Kollimatoren den stabilen Betrieb hochpräziser elektromagnetischer Steuerungssysteme. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Reduzierung der Masse durch Mikrostrukturdesign (z. B. poröse Kollimationslamellen), den Einsatz von Nanobeschichtungen zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit und Biokompatibilität oder die Kombination additiver Fertigungstechnologien zur Erzielung komplexer Kollimationsstrukturen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Komponentenleistung durch Strahlenschutztests, Wärmeleitfähigkeitsprüfungen und geometrische Genauigkeitsmessungen, um die Einhaltung medizinischer Standards zu gewährleisten.

## 9.2 Diagnostische Bildgebungsgeräte

Bildgebende Diagnostikgeräte sind eine Kerntechnologie der modernen Medizin zur Diagnose von Krankheiten und Behandlungsplanung. Sie erzeugen Bilder des menschlichen Körperinneren durch hochpräzise Strahlung oder Magnetfelder. Dafür sind Materialien mit hoher Dichte zur Abschirmung der Strahlung, nichtmagnetischen Eigenschaften zur Vermeidung elektromagnetischer Störungen, exzellenter Wärmeleitfähigkeit zur Regulierung der Betriebswärme und guter Biokompatibilität zur Gewährleistung der Sicherheit erforderlich. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen können dank ihrer hohen Dichte und nichtmagnetischen Eigenschaften Röntgenstrahlen effektiv abschirmen und für einen ausgewogenen Gewichtsausgleich sorgen. Hohe Wärmeleitfähigkeit und niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient unterstützen das Wärmemanagement und die Dimensionsstabilität. Die Zähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindephase erhöht die Haltbarkeit der Komponenten. Die Legierung wird

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durch Flüssigphasensintern, heißstatisches Pressen und Präzisionsbearbeitungsverfahren hergestellt, um eine dichte Mikrostruktur zu bilden, die den Anforderungen diagnostischer Bildgebungsgeräte an hohe Präzision und Zuverlässigkeit gerecht wird.

### 9.2.1 CT-Detektor-Schutzteile

CT-Detektorabschirmungen sind Schlüsselkomponenten von Computertomographie-Geräten (CT). Sie dienen der Abschirmung von gestreuten Röntgenstrahlen, dem Schutz von Detektormodulen und Patienten vor unnötiger Strahlenbelastung sowie der Gewährleistung der Klarheit und Genauigkeit der Bildsignale. Aufgrund ihrer hohen Dichte und nichtmagnetischen Eigenschaften hat sich eine Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung zum bevorzugten Material für CT-Detektorabschirmungen entwickelt. Durch die hohe Dichte werden Röntgenstrahlen wirksam absorbiert und die Streustrahlung deutlich reduziert. Das Material ist dünner und umweltfreundlicher als herkömmliche Bleimaterialien und bietet eine hervorragende Abschirmwirkung. Die nichtmagnetischen Eigenschaften verhindern, dass Magnetfelder die Präzisionselektronikkomponenten von CT-Geräten (wie Detektor-Arrays oder Signalverarbeitungsschaltungen) stören, und gewährleisten so die Stabilität der Bilderfassung. Die hohe Wärmeleitfähigkeit leitet die während des Betriebs vom Detektor erzeugte Wärme schnell ab und verhindert so, dass Überhitzung die Empfindlichkeit des Detektors beeinträchtigt. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die Formstabilität der Abschirmung während thermischer Zyklen und sorgt für eine präzise Passform am Detektormodul.

Im Herstellungsprozess werden Schutzteile aus einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung mittels Metallspritzguss (MIM) oder Pulvermetallurgie hergestellt, um den Anforderungen von CT-Geräten an komplexe Formen und hohe Präzision gerecht zu werden. Die MIM-Technologie erzeugt durch Mischen von Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver mit einem Bindemittel, Entfetten und Flüssigphasensintern nach dem Spritzguss eine hochdichte Struktur. Die Nickel-Kupfer-Flüssigphase benetzt die Wolframpartikel und verbessert so deren mechanische Eigenschaften und Wärmeleitfähigkeit. Heißstatisches Pressen beseitigt zusätzlich Mikroporen, verbessert die Dichte und Strahlungsabsorptionsfähigkeit der Schutzteile und eignet sich für hochenergetische Röntgenumgebungen. Durch Präzisionsbearbeitung werden komplexe geometrische Formen mit mikrometergenauen Toleranzen erzielt, um eine nahtlose Integration der Schutzteile in die Detektormodule zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen (z. B. elektrochemisches Polieren oder chemische Passivierung) verbessern die Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität und verhindern Erosion durch Oxidation oder Desinfektion im Langzeiteinsatz.

Bei CT-Geräten verbessern Schutzteile aus Wolfram-Nickel-Kupfer die Bildqualität und Gerätesicherheit deutlich. Beispielsweise reduzieren hochdichte Schutzteile in hochauflösenden CT-Scannern effektiv Streustrahlen und verbessern den Bildkontrast. Bei mobilen CT-Geräten unterstützen nichtmagnetische und leichte Designs die Tragbarkeit und elektromagnetische Verträglichkeit. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Optimierung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, den Einsatz von Nanobeschichtungen (z. B. DLC) zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit oder die Kombination von 3D-Drucktechnologie zur Herstellung maßgeschneiderter Schutzstrukturen. Die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Qualitätskontrolle überprüft die Leistung der Schutzteile durch Strahlenschutztests (gemäß IEC 60601), Wärmeleitfähigkeitstests und Biokompatibilitätstests (ISO 10993).

### 9.2.2 Gegengewichte für MRT-Geräte

Das Gegengewicht von Magnetresonanztomographie-Geräten (MRT) ist eine Schlüsselkomponente im MRT-System. Es dient der Ausrichtung des Geräteschwerpunkts bzw. der Balance der mechanischen Struktur und gewährleistet so die Stabilität und Genauigkeit der Scanplattform oder der Magnetanordnung während des Betriebs. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen eignen sich aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer Nichtmagnetizität und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ideal als Gegengewicht für MRT-Geräte. Die hohe Dichte ermöglicht es der Legierung, ausreichend Masse auf kleinem Raum bereitzustellen, die Schwerpunktverteilung von MRT-Geräten (wie z. B. Scanbetten oder Gradientenspulen) präzise zu steuern, Vibrationen oder mechanischen Versatz zu reduzieren und die Bildschärfe zu verbessern. Die Nichtmagnetizität ist entscheidend, um Interferenzen des Magnetfelds mit dem hochintensiven Magnetfeld (1,5 T–7 T) der MRT zu vermeiden und so die Gleichmäßigkeit des Magnetfelds und die Genauigkeit der Signalerfassung zu gewährleisten. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die Dimensionsstabilität des Gegengewichts bei steigenden Temperaturen im Gerätebetrieb oder Umgebungstemperaturunterschieden und erhält die langfristige Zuverlässigkeit der mechanischen Struktur.

Im Herstellungsprozess werden Gegengewichte aus Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen mittels MIM (Melting Imaging) oder Pulvermetallurgie hergestellt, um den Anforderungen von MRT-Geräten an komplexe Formen und Miniaturisierung gerecht zu werden. Die MIM-Technologie formt winzige Blöcke im Spritzgussverfahren. Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen verbessern die Dichte, eliminieren Mikroporen und verbessern die mechanischen Eigenschaften sowie die Wärmeleitfähigkeit. Durch Präzisionsbearbeitung (z. B. CNC-Fräsen oder EDM) lassen sich komplexe geometrische Formen mit  $\mu\text{m}$ -Toleranzen erzielen, was für das kompakte Design von MRT-Geräten geeignet ist. Oberflächenbehandlungen (z. B. PVD- TiN- Beschichtung oder elektrochemisches Polieren) verbessern die Korrosionsbeständigkeit und Oberflächengüte und reduzieren das Risiko von Oxidation oder Kontamination in einer sterilisierten Umgebung. Die Verarbeitung muss in einer hochreinen Umgebung erfolgen, um zu verhindern, dass Staubkontamination die Komponentenleistung oder die MRT-Magnetfelder beeinträchtigt. In MRT-Anwendungen verbessern Wolfram-Nickel-Kupfer-Gegengewichte die Geräteleistung deutlich. Beispielsweise optimieren hochdichte Gegengewichte bei Hochfeld-MRT-Geräten das dynamische Gleichgewicht der Scanplattform und reduzieren die Auswirkungen von Vibrationen auf die Bildqualität. Bei tragbaren MRT-Systemen gewährleisten nichtmagnetische Gegengewichte die Magnetfeldstabilität und elektromagnetische Verträglichkeit. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Reduzierung der Masse durch Mikrostrukturdesign (z. B. hohle Gegengewichte), den Einsatz korrosionsbeständiger Beschichtungen zur Verbesserung der Biokompatibilität oder die Kombination additiver Fertigungstechnologien zur Herstellung maßgeschneiderter Gegengewichtsstrukturen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Leistung der Gegengewichte durch Dichtemessung, Magnetisierungsstärkeprüfung und Vibrationstests, um die Einhaltung medizinischer Standards sicherzustellen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 9.3 Chirurgische Instrumente

Chirurgische Instrumente sind zentrale Werkzeuge für präzise Diagnose und Behandlung in der modernen Medizin und umfassen chirurgische Navigationssysteme, minimalinvasive interventionelle Instrumente und implantierbare medizinische Geräte. Sie erfordern Materialien mit hoher Dichte zur Optimierung des Gewichtsausgleichs, nichtmagnetischen Eigenschaften zur Vermeidung elektromagnetischer Störungen, hervorragenden mechanischen Eigenschaften zur Gewährleistung der Haltbarkeit und guter Biokompatibilität zur Erfüllung der Sicherheitsstandards für den Einsatz in vivo oder auf der Körperoberfläche. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen ermöglichen aufgrund ihrer hohen Dichte und nichtmagnetischen Eigenschaften eine präzise Gewichtskontrolle und elektromagnetische Verträglichkeit. Die Zähigkeit und hohe Wärmeleitfähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase verbessern die Haltbarkeit und das Wärmemanagement des Instruments. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet Dimensionsstabilität bei Körpertemperatur oder in sterilisierter Umgebung. Die Legierung wird durch Flüssigphasensintern, heißisostatisches Pressen und Präzisionsbearbeitung hergestellt, um eine dichte Mikrostruktur zu bilden, die den Anforderungen chirurgischer Instrumente an hohe Präzision und Zuverlässigkeit gerecht wird.

#### 9.3.1 Hochpräzise chirurgische Navigationspositionierungskomponenten

Hochpräzise Positionierungsteile für die chirurgische Navigation sind Schlüsselkomponenten zur Positionierung und Führung chirurgischer Instrumente in chirurgischen Navigationssystemen. Sie werden häufig in der Neurochirurgie, Orthopädie und Herz-Kreislauf-Chirurgie eingesetzt, um die Genauigkeit und Sicherheit chirurgischer Behandlungspfade zu gewährleisten. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen sind aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer Nichtmagnetizität und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten das bevorzugte Material für Positionierungsteile für die chirurgische Navigation. Die hohe Dichte ermöglicht es der Legierung, ausreichend Masse auf kleinem Raum bereitzustellen, die Schwerpunktverteilung der Positionierungsteile zu optimieren, die Stabilität des chirurgischen Navigationssystems zu erhöhen und insbesondere die Positionierungsgenauigkeit bei dynamischen Anpassungen (z. B. in der roboterassistierten Chirurgie) zu verbessern. Die nichtmagnetischen Eigenschaften verhindern Störungen durch Magnetfelder auf elektronische Komponenten des Navigationssystems (wie elektromagnetische Tracker oder optische Sensoren) und gewährleisten so die Zuverlässigkeit in Umgebungen mit Magnetresonanztomographie oder elektromagnetischer Navigation. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die Dimensionsstabilität der Positionierungsteile bei Körpertemperatur oder in sterilisierter Umgebung und gewährleistet so die Navigationsgenauigkeit.

Im Herstellungsprozess werden aus einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung Positionierungsteile mittels Metallspritzguss (MIM) oder Pulvermetallurgie hergestellt, um die Anforderungen chirurgischer Navigationssysteme an komplexe Formen und mikrometeregenaue Präzision zu erfüllen. Die MIM-Technologie erzeugt eine hochdichte Struktur durch Mischen von Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver mit einem Bindemittel, Entfetten und Flüssigphasensintern nach dem Spritzguss. Die Nickel-Kupfer-Flüssigphase benetzt die Wolframpartikel und verbessert so die mechanischen Eigenschaften und die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeleitfähigkeit. Heißisostatisches Pressen eliminiert zusätzlich Mikroporen, verbessert die Dichte und Haltbarkeit der Positionierungsteile und eignet sich für hochpräzise Anwendungen. Präzisionsbearbeitung (wie Lasermikrobearbeitung oder Elektrofunkturbearbeitung) ermöglicht komplexe Geometrien mit mikrometergenauen Toleranzen, um eine nahtlose Integration in Navigationssysteme zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen (wie elektrochemisches Polieren oder PVD- TiN- Beschichtung) verbessern die Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität, verhindern Oxidation während der Sterilisation oder in In-vivo-Umgebungen und erfüllen die Biokompatibilitätsnorm ISO 10993.

In chirurgischen Navigationsanwendungen verbessern Wolfram-Nickel-Kupfer-Positionierungsteile die chirurgische Präzision und Sicherheit deutlich. Beispielsweise optimieren hochdichte Positionierungsteile in der neurochirurgischen Navigation die Stabilität des Leitsystems und gewährleisten Gehirnoperationen mit Mikrometerpräzision. In der orthopädischen Chirurgie vermeiden nichtmagnetische Positionierungsteile elektromagnetische Störungen und verbessern die Zuverlässigkeit des Navigationssystems. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Verbesserung der Zähigkeit durch Optimierung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses, den Einsatz von Nanobeschichtungen zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit und Biokompatibilität oder die Kombination von 3D-Drucktechnologie zur Herstellung maßgeschneiderter Positionierungsstrukturen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Leistung der Positionierungsteile durch Dichtemessung, Magnetisierungsstärkeprüfung und Oberflächenrauheitsprüfung, um medizinische Standards zu erfüllen.

### 9.3.2 Führungskomponenten für minimalinvasive interventionelle Geräte

Schlüsselkomponenten zur Führung von Führungsdrähten, Kathetern oder Stents bei minimalinvasiven Eingriffen (z. B. kardiovaskulären Eingriffen oder endoskopischen Operationen). Sie erfordern hohe Präzision, Biokompatibilität und Langlebigkeit, um den Operationserfolg und die Patientensicherheit zu gewährleisten. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen eignen sich aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften und ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften ideal für Führungskomponenten. Die hohe Dichte ermöglicht es der Legierung, ausreichend Masse auf kleinem Raum bereitzustellen, die Schwerpunktverteilung der Führungskomponente zu optimieren und die Manövrierfähigkeit und Stabilität des Führungsdrahts oder Katheters zu verbessern, insbesondere für die präzise Führung in komplexen Gefäßwegen. Die nichtmagnetische Eigenschaft verhindert die Beeinflussung elektronischer Komponenten (wie Sensoren oder Bildgebungsmodule) in interventionellen Geräten durch Magnetfelder und eignet sich für minimalinvasive Operationen mit Magnetresonanztomographie (MRT). Die Zähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindephase ermöglicht der Komponente wiederholte Biegung und Torsion, und der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet Dimensionsstabilität bei Körpertemperatur oder in sterilisierter Umgebung.

Im Herstellungsprozess werden Führungskomponenten aus Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen mittels MIM (Mikropulvermetallurgie) hergestellt, um den Anforderungen minimalinvasiver Geräte hinsichtlich Miniaturisierung und komplexer Formen gerecht zu werden. Die MIM-Technologie formt winzige Blöcke im Spritzgussverfahren. Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen erhöhen die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dichte, eliminieren Mikroporen und verbessern die mechanischen Eigenschaften sowie die Wärmeleitfähigkeit. Durch Präzisionsbearbeitung (z. B. Laser-Mikrobearbeitung oder Elektrofunktionsbearbeitung) werden komplexe Geometrien wie Führungsringe für Führungsdrähte oder Katheterspitzen mit mikrometeregenauen Toleranzen erzielt, um eine präzise Handhabung während der Operation zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen (z. B. DLC-Beschichtung oder chemische Passivierung) verbessern Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität, reduzieren die Reibung mit Gefäßgewebe und verhindern Oxidation oder Desinfektionserosion im Langzeitgebrauch. Die Bearbeitung muss in einer hochreinen Umgebung erfolgen, um eine Beeinträchtigung der Komponentenleistung durch Staubbelastung zu verhindern.

In der minimalinvasiven Chirurgie verbessern Führungskomponenten aus Wolfram-Nickel-Kupfer die chirurgische Effizienz und Sicherheit deutlich. Beispielsweise optimieren hochdichte Führungskomponenten bei der Implantation kardiovaskulärer Stents die Manövrierfähigkeit des Führungsdrahtes und gewährleisten eine präzise Positionierung. In der neurointerventionellen Chirurgie vermeiden nichtmagnetische Führungskomponenten Störungen durch die MRT-Umgebung und verbessern die Zuverlässigkeit der Bildführung.

Zu den Optimierungsmöglichkeiten zählen die Reduzierung der Masse durch Mikrostrukturdesign (z. B. Hohlführungen), der Einsatz biokompatibler Beschichtungen zur Verbesserung der Gewebeaffinität oder die Kombination additiver Fertigungsverfahren zur Entwicklung personalisierter Führungsstrukturen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Komponentenleistung durch mechanische Eigenschaftsprüfungen, Biokompatibilitätstests (ISO 10993) und Oberflächenrauheitsmessungen.

## 9.4 Rehabilitationshilfsmittel

Rehabilitationshilfen sind wichtige Hilfsmittel der modernen Medizin, um Patienten bei der Wiederherstellung ihrer motorischen Funktionen oder der Verbesserung ihrer Lebensqualität zu unterstützen. Sie erfordern Materialien mit hoher Dichte zur Optimierung der Gewichtsverteilung, hervorragenden mechanischen Eigenschaften zur Gewährleistung der Haltbarkeit, nichtmagnetischen Eigenschaften zur Vermeidung elektromagnetischer Störungen und guter Biokompatibilität zur Erfüllung der Sicherheitsstandards für den Langzeitgebrauch. Eine Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ermöglicht dank ihrer hohen Dichte und nichtmagnetischen Eigenschaften eine präzise Gewichtskontrolle und elektromagnetische Verträglichkeit. Die Zähigkeit und hohe Wärmeleitfähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase verbessern die Haltbarkeit und das Wärmemanagement der Komponenten. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet Dimensionsstabilität bei Körpertemperatur oder Umgebungstemperaturunterschieden. Die Legierung wird durch Flüssigphasensintern, heißisostatisches Pressen und Präzisionsbearbeitung hergestellt, um eine dichte Mikrostruktur zu bilden, die den Anforderungen an hohe Präzision und Zuverlässigkeit für Rehabilitationshilfen gerecht wird.

### 9.4.1 Prothetische Gelenkgewichtskomponenten

Gewichtskomponenten für Prothesengelenke sind zentrale Komponenten des Prothesendesigns. Sie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dienen der Anpassung der Schwerpunktverteilung der Prothese, der Optimierung von Bewegungsgleichgewicht und natürlichem Gang sowie der Verbesserung von Komfort und Funktionalität des Patienten. Aufgrund ihrer hohen Dichte, Nichtmagnetizität und hervorragenden mechanischen Eigenschaften hat sich Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung zum bevorzugten Material für Gewichtskomponenten für Prothesengelenke entwickelt. Dank ihrer hohen Dichte bietet die Legierung ausreichend Masse auf kleinem Raum, steuert den Schwerpunkt des Prothesengelenks präzise, simuliert die Gewichtsverteilung natürlicher Gliedmaßen und reduziert die Ermüdung des Patienten beim Tragen der Prothese. Die Nichtmagnetizität verhindert Störungen der in die Prothese eingebetteten elektronischen Komponenten durch Magnetfelder, was sie für intelligente Prothesensysteme geeignet macht. Dank der Zähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindephase sind die Gewichtskomponenten wiederholten mechanischen Belastungen und Stößen standhalten, beispielsweise beim Gehen oder Laufen. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die Formstabilität der Bauteile bei Körpertemperatur bzw. Umgebungstemperaturunterschieden und erhält die Bewegungsgenauigkeit der Verbindung.

Im Herstellungsprozess werden Gewichtskomponenten aus einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung mittels Metallspritzguss (MIM) oder Pulvermetallurgie hergestellt, um den Anforderungen von Prothesen an Miniaturisierung, komplexe Formen und hohe Präzision gerecht zu werden. Die MIM-Technologie erzeugt durch Mischen von Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver mit einem Bindemittel, Entfetten und Flüssigphasensintern nach dem Spritzguss eine hochdichte Struktur. Die Nickel-Kupfer-Flüssigphase benetzt die Wolframpartikel und verbessert so deren mechanische Eigenschaften und Wärmeleitfähigkeit. Heißisostatisches Pressen eliminiert zusätzlich Mikroporen, verbessert die Dichte und Haltbarkeit der Gewichtskomponenten und eignet sich für den langfristigen Einsatz in Prothesen. Durch Präzisionsbearbeitung werden komplexe Geometrien mit  $\mu\text{m}$ -Toleranzen erzielt, um eine präzise Passform im Prothesengelenk zu gewährleisten. Die Oberflächenbehandlung verbessert die Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität, verhindert Oxidation bei Langzeitgebrauch oder Reizungen bei Hautkontakt und erfüllt die Biokompatibilitätsnorm ISO 10993.

#### 9.4.2 Balance-Einstellteile für Reha-Geräte

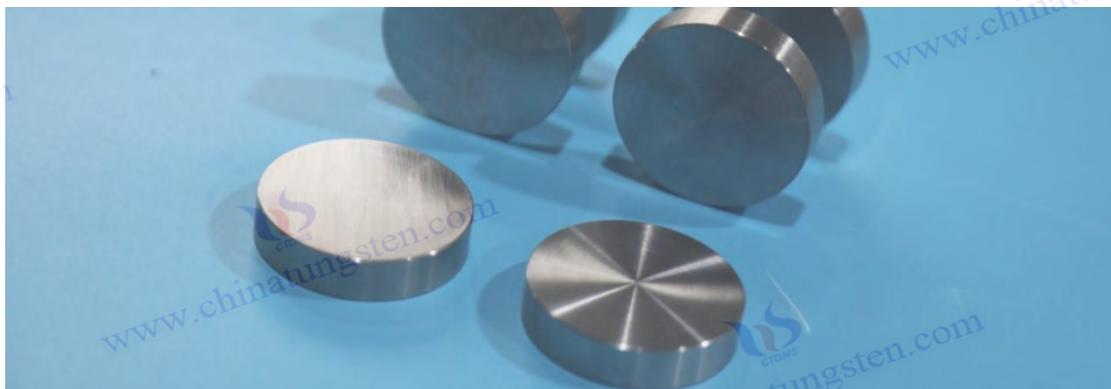
Balance-Einstellteile für Rehabilitationsgeräte sind Schlüsselkomponenten von Rehabilitationstrainingsgeräten (wie z. B. Gehtrainern oder Krafttrainingsgeräten). Sie dienen der Anpassung des Schwerpunkts oder des Bewegungswiderstands des Geräts, um Stabilität und Sicherheit während des Trainings zu gewährleisten und gleichzeitig den Rehabilitationseffekt des Patienten zu optimieren. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen eignen sich aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften und ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften ideal als Material für Balance-Einstellteile von Rehabilitationsgeräten. Die hohe Dichte ermöglicht es der Legierung, ausreichend Masse innerhalb eines begrenzten Volumens bereitzustellen, die Schwerpunktverteilung des Geräts präzise zu steuern, die Stabilität des Geräts bei dynamischer Bewegung zu verbessern und die Beeinträchtigung des Patienten durch Vibrationen oder Versatz zu reduzieren. Die nichtmagnetische Eigenschaft verhindert die Beeinflussung elektronischer Komponenten von Rehabilitationsgeräten (wie Bewegungssensoren oder Steuerungssystemen) durch Magnetfelder und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eignet sich daher für intelligente Rehabilitationsgeräte. Die hohe Zähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase ermöglicht den Einstellteilen, wiederholten mechanischen Belastungen standzuhalten. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet Dimensionsstabilität bei Körpertemperatur oder Umgebungstemperaturunterschieden und somit eine gleichbleibende Einstellgenauigkeit.

Im Herstellungsprozess werden aus einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung mittels MIM- oder Pulvermetallurgieverfahren Ausgleichsteile hergestellt, um den Anforderungen von Rehabilitationsgeräten an komplexe Formen und hohe Präzision gerecht zu werden. Die MIM-Technologie formt winzige Blöcke im Spritzgussverfahren. Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen erhöhen die Dichte, eliminieren Mikroporen und verbessern die mechanischen Eigenschaften sowie die Wärmeleitfähigkeit. Durch Präzisionsbearbeitung (z. B. EDM oder CNC-Schleifen) werden komplexe geometrische Formen erzielt. Die Toleranzen werden im Mikrometerbereich kontrolliert, um die präzise Passung der Ausgleichsteile mit der Gerätestruktur zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen (z. B. DLC-Beschichtung oder chemische Passivierung) verbessern Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität, reduzieren die Reibung mit der Patientenhaut und verhindern Oxidation in einer sterilen Umgebung. Die Verarbeitung muss in einer hochreinen Umgebung erfolgen, um eine Beeinträchtigung der Komponentenleistung durch Staubbelastung zu verhindern.

Bei Rehabilitationsgeräten verbessern Wolfram-Nickel-Kupfer-Balanceregler die Trainingsergebnisse und die Gerätezuverlässigkeit deutlich. Beispielsweise optimieren hochdichte Regler bei Gangtrainern den Schwerpunkt des Geräts und erhöhen die Stabilität während des Trainings. Bei Kraftrehabilitationsgeräten vermeiden nichtmagnetische Regler Störungen durch elektronische Steuerungssysteme und verbessern die Genauigkeit der Bewegungsbahnen. Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Optimierung der Gewichtsverteilung durch Mikrostrukturdesign (z. B. Gradientendichteregler), den Einsatz von Nanobeschichtungen zur Verbesserung von Haltbarkeit und Biokompatibilität oder die Kombination additiver Fertigungstechnologien zur Erzielung personalisierter Einstellstrukturen. Die Qualitätskontrolle überprüft die Leistung der Regler durch Dichtemessung, Vibrationstests und Biokompatibilitätsprüfungen, um die Einhaltung medizinischer Standards (z. B. ISO 13485) sicherzustellen.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Kapitel 10 Vergleich zwischen Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung und anderen Materialien

Wolfram -Nickel-Kupfer-Legierungen finden aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften, ihrer hervorragenden Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, Medizin, Elektronik, Verteidigung und im Energiebereich. Die pulvermetallurgisch hergestellten Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen vereinen die hohe Dichte von Wolfram mit der Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase und erfüllen so die Anforderungen verschiedenster anspruchsvoller Anwendungen. In der Praxis werden Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen jedoch häufig mit anderen Hochleistungswerkstoffen wie Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen und Kupfer-Wolfram-Legierungen verglichen, um ihre Leistungsvorteile und Anwendbarkeit zu bewerten. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften, Herstellungsverfahren und Kostenunterschiede verschiedener Werkstoffe bestimmen ihre Wettbewerbsfähigkeit in spezifischen Anwendungen.

### 10.1 Analyse von Konkurrenzmaterialien aus Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen (W-Ni-Cu) werden aufgrund ihrer hohen Dichte ( $15 - 18 \text{ g/cm}^3$ ), nichtmagnetischen Eigenschaften, guten Wärmeleitfähigkeit und Biokompatibilität häufig in Gewichts-, Wärmeableitungs-, Abschirm- und Schutzkomponenten verwendet. Allerdings gibt es erhebliche Unterschiede hinsichtlich Leistung und Kosten zu Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen (W-Ni-Fe) und Kupfer-Wolfram-Legierungen (W-Cu). Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sind aufgrund ihrer hohen Festigkeit und niedrigen Kosten im militärischen und industriellen Bereich im Vorteil, ihr Magnetismus schränkt jedoch Anwendungen mit hohen Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit ein. Kupfer-Wolfram-Legierungen zeichnen sich aufgrund ihrer ausgezeichneten thermischen und elektrischen Leitfähigkeit in den Bereichen Elektronik und Wärmemanagement aus, weisen jedoch eine geringe Dichte und geringe Zähigkeit auf. Die Auswahl konkurrierender Materialien muss gegen die Anwendungsanforderungen (wie nichtmagnetische Eigenschaften, Wärmeleitfähigkeit oder Kosten) abgewogen werden.

#### 10.1.1 Vergleich mit Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

Wolfram-Nickel-Eisen (W-Ni-Fe) ist eine gängige hochdichte Legierung, die in der Rüstungsindustrie (z. B. für panzerbrechende Kerne), in der Luft- und Raumfahrt sowie in Industrieanlagen weit verbreitet ist. Ihre Hauptbestandteile sind Wolfram (85–98 %), Nickel und Eisen. Ihr Dichtebereich ähnelt dem einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung. Im Vergleich zu einer Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung weist eine Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung erhebliche Unterschiede hinsichtlich mechanischer Eigenschaften, Kosten und Anwendungsszenarien auf.

**Leistungsvergleich** : Festigkeit und Härte von Wolfram- Nickel -Eisen-Legierungen sind im Allgemeinen höher als die von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Die Zugabe von Eisen verbessert die mechanischen Eigenschaften der Nickel-Eisen-Bindungsphase und macht sie vorteilhafter für Anwendungen mit hoher Schlagfestigkeit und Verschleißfestigkeit (z. B. panzerbrechende Projektilkerne)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oder mechanische Gegengewichte). Durch die Zugabe von Eisen wird die Legierung jedoch schwach magnetisch, was ihren Einsatz in Anwendungen mit hohen Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit (z. B. MRT-Geräte und elektronische Gegenmaßnahmen) einschränkt. Die nichtmagnetische Natur der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist ihr Hauptvorteil. Sie eignet sich für Anwendungen, in denen elektromagnetische Störungen vermieden werden müssen, wie z. B. in medizinischen Geräten und Radarsystemen. Die Wärmeleitfähigkeit der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ist geringfügig höher als die der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung. Da Kupfer eine bessere Wärmeleitfähigkeit als Eisen aufweist, eignet es sich für Wärmeableitungsanwendungen (z. B. elektronische Kühlkörper). Die Wärmeausdehnungskoeffizienten beider Legierungen sind ähnlich, und beide bieten eine gute Dimensionsstabilität.

**Vergleich der Herstellungsverfahren** : Beide Legierungen werden pulvermetallurgisch hergestellt, einschließlich Pulvermischen, Pressen und Flüssigphasensintern. Die Sintertemperatur der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist jedoch etwas niedriger, und die Herstellungskosten sind niedriger, da der Eisenpreis deutlich niedriger ist als der von Kupfer. Die Herstellung der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung erfordert strengere Umweltkontrollen (z. B. hochreines Argon oder Vakuum), um die Oxidation des Kupfers zu verhindern, was die Produktionskosten erhöht. Die Verarbeitungsleistung der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist etwas schlechter, da ihre höhere Härte zu Werkzeugverschleiß führen kann, während die Zähigkeit der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung die Herstellung komplexer Formen bei der Präzisionsbearbeitung (z. B. MIM- oder CNC-Bearbeitung) erleichtert.

**Anwendungsszenarien sowie Vor- und Nachteile** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden aufgrund ihrer hohen Festigkeit und geringen Kosten häufig im militärischen Bereich (z. B. panzerbrechende Kerne, Raketengegengewichte) und in industriellen Gegengewichten (z. B. Schwingungsdämpfer) verwendet. Aufgrund ihres schwachen Magnetismus sind sie jedoch für elektromagnetisch empfindliche Umgebungen ungeeignet. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen bieten weitere Vorteile in der Medizin (MRT-Gegengewichte, Strahlentherapie-Abschirmung), in der elektronischen Informationstechnik (5G-Hochfrequenzmodule) und in der Luft- und Raumfahrt (Gegengewichte zur Lageregelung). Ihre nichtmagnetischen Eigenschaften und ihre Biokompatibilität erfüllen hohe Anforderungen an Präzision und Sicherheit. Der Nachteil von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen sind ihre hohen Kosten, die ihre Wirtschaftlichkeit beeinträchtigen, insbesondere bei schwankenden Kupferpreisen. Optimierungsansätze umfassen die Leistungssteigerung durch Anpassung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses oder den Einsatz additiver Fertigung zur Senkung der Verarbeitungskosten.

### 10.1.2 Vergleich mit Kupfer-Wolfram-Legierung

Kupfer-Wolfram-Legierung (W-Cu) ist ein Verbundwerkstoff mit Wolfram als Matrix und Kupfer als Bindephase. Sie wird häufig in der elektronischen Wärmeableitung, in elektrischen Kontakten und bei Hochtemperaturkomponenten eingesetzt. Die typische Zusammensetzung umfasst Wolfram (70–90 %) und Kupfer, und die Dichte liegt zwischen 12 und 17 g/cm<sup>3</sup>. Im Vergleich zur Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung weist die Kupfer-Wolfram-Legierung erhebliche Unterschiede hinsichtlich der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeleitfähigkeit, der elektrischen Leitfähigkeit und der Anwendungsszenarien auf.

**Leistungsvergleich** : Die Wärmeleitfähigkeit und die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer-Wolfram-Legierungen sind besser als die von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Der höhere Kupferanteil (10–30 %) verbessert die Wärme- und Stromleitung und eignet sich daher hervorragend für die Wärmeableitung in Hochleistungselektronik (z. B. Leistungshalbleitersubstrate, Server-Kühlkörper) und als Elektrodenmaterial. Die Dichte von Kupfer-Wolfram-Legierungen ist jedoch geringer als die von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen, was ihre Anwendung in Anwendungen mit hohem Gewichtsausgleich (z. B. Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt und Raketenausgleichskomponenten) einschränkt. Die mechanischen Eigenschaften von Kupfer-Wolfram-Legierungen sind schwach, und ihre Zähigkeit und Schlagfestigkeit sind nicht so gut wie die von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Aufgrund der fehlenden verstärkenden Wirkung von Nickel bricht sie unter hoher Belastung leicht. Die nicht magnetische Natur von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen ist ihr Vorteil und eignet sich für elektromagnetisch empfindliche Umgebungen. Obwohl Kupfer-Wolfram-Legierungen ebenfalls nicht magnetisch sind, ist ihre Abschirmwirkung aufgrund ihrer geringeren Dichte etwas geringer. Die Wärmeausdehnungskoeffizienten beider Legierungen sind ähnlich und eignen sich für Anwendungen, die Dimensionsstabilität erfordern.

**Vergleich der Herstellungsverfahren** : Kupfer-Wolfram-Legierungen und Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen werden beide pulvermetallurgisch hergestellt, aber Kupfer-Wolfram-Legierungen werden üblicherweise durch Infiltration hergestellt (zuerst Sintern des Wolframskeletts, dann Infiltration von flüssigem Kupfer), was aufwändig und energieintensiv ist. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen werden durch Flüssigphasensintern hergestellt, sind flexibler und ermöglichen durch MIM die Herstellung komplexer Formen, wodurch sie sich für miniaturisierte Komponenten (wie medizinische Kollimatoren und MEMS-Gegengewichte) eignen. Kupfer-Wolfram-Legierungen sind aufgrund ihrer hohen Härte und der weichen Kupferphase schwierig zu verarbeiten, was leicht zu unebenen Oberflächen führen kann, während Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen aufgrund ihrer Zähigkeit vorteilhafter für die Präzisionsbearbeitung sind. Kupfer-Wolfram-Legierungen haben einen hohen Kupfergehalt und die Sinteratmosphäre muss streng kontrolliert werden, um Oxidation zu verhindern, was die Prozesskosten erhöht.

**Anwendungsszenarien sowie Vor- und Nachteile** : Kupfer-Wolfram-Legierungen werden aufgrund ihrer hervorragenden Wärme- und elektrischen Leitfähigkeit häufig in der Elektronikindustrie (z. B. Gehäuse für Leistungshalbleiter, elektrische Kontakte) und bei Hochtemperaturkomponenten (z. B. Auskleidungen von Raketendüsen) verwendet. Ihre geringere Dichte und geringe Zähigkeit schränken ihre Anwendung jedoch bei Gegengewichten mit hoher Dichte oder in Szenarien mit hoher Aufprallbelastung ein. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen bieten weitere Vorteile in den Bereichen Medizin (Abschirmung für Strahlentherapie, Gegengewichte für MRT), Landesverteidigung (Radarköder, Gegengewichte für Raketen) und Fahrzeuge mit alternativer Energie (Motorgewichte). Ihre hohe Dichte und Zähigkeit erfüllen komplexe mechanische und elektromagnetische Anforderungen. Aufgrund ihres hohen Kupfergehalts schwanken die Kosten von Kupfer-Wolfram-Legierungen stark, während die Kosten von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen von

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

den Nickel- und Kupferpreisen beeinflusst werden. Das Verhältnis muss optimiert werden, um den wirtschaftlichen Druck zu verringern. Zu den Optimierungsrichtungen gehören die Verbesserung der Zähigkeit von Kupfer-Wolfram-Legierungen durch Verbundbeschichtungen oder die Verwendung von Wolframpulver im Nanomaßstab zur Verbesserung der Leistung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen.

## 10.2 Forschung und Entwicklung von Spitzentechnologie für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen

Mit der steigenden Nachfrage nach Hochleistungswerkstoffen verlagert sich die Forschung und Entwicklung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen von der traditionellen Leistungsoptimierung hin zu Mikrostrukturdesign und funktionaler Innovation. Nanostrukturierte Legierungen verbessern die Festigkeit, Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Werkstoffen deutlich, indem sie die Größe der Pulverpartikel auf den Nanometerbereich reduzieren. Dadurch eignen sie sich für hochpräzise Anwendungen und Anwendungen in extremen Umgebungen. Funktionale Gradientenmaterialien erreichen maßgeschneiderte Leistung durch eine graduelle Verteilung der Zusammensetzung oder Struktur innerhalb der Legierung, um komplexe und multifunktionale Anforderungen zu erfüllen. Diese Technologien fördern durch fortschrittliche Herstellungsverfahren neue Anwendungen von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in den Bereichen Medizin, Elektronik, Verteidigung und Energie und unterstützen so die nächste Generation von Hochleistungskomponenten.

### 10.2.1 Nanostrukturierte Legierungen

Nanostrukturierte Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen werden aus nanoskaligen Wolfram-, Nickel- und Kupferpulvern hergestellt, wodurch die Mikrostruktur und die Eigenschaften der Legierung deutlich verbessert werden. Nanopartikel verfügen über eine hohe spezifische Oberfläche und Oberflächenaktivität, wodurch beim Sintern eine gleichmäßigere Mikrostruktur gebildet, die Porosität verringert und Dichte, Festigkeit und Zähigkeit verbessert werden können. Im Vergleich zu herkömmlichen mikrometergroßen Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen sind die mechanischen Eigenschaften nanostrukturierter Legierungen deutlich verbessert, da die korngrenzenverstärkende Wirkung der Nanopartikel die Schlagfestigkeit und Ermüdungsbeständigkeit erhöht. Die nichtmagnetischen Eigenschaften bleiben erhalten, was sie für Anwendungen mit hohen Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit (wie MRT-Geräte, Radarsysteme) geeignet macht. Zudem verbessert die gleichmäßige Verteilung der Nanopartikel die Wärmeleitfähigkeit, wodurch die Legierung in Wärmeableitungsanwendungen (wie Leistungshalbleitersubstraten, 5G-HF-Modulen) leistungsfähiger wird. Die feinen Körner der Nanostruktur verringern außerdem den Wärmeausdehnungskoeffizienten

**Herstellungsverfahren** : Nanostrukturierte Legierungen werden üblicherweise durch Hochenergie-Kugelmahlen, chemische Gasphasenabscheidung (CVD) oder plasmaunterstützte Verfahren zur Herstellung von Nanopulvern hergestellt und anschließend durch pulvermetallurgische Prozesse (wie Flüssigphasensintern oder Funkenplasmasintern, SPS) zu dichten Legierungen geformt. Beim

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochenergie-Kugelmahlen werden Pulverpartikel durch **mechanisches** Mahlen auf Nanogröße verfeinert, und Mahlzeit und -umgebung (hochreines Argon oder Vakuum) müssen kontrolliert werden, um das Eindringen von Verunreinigungen zu vermeiden. Die SPS-Technologie verwendet Hochspannung und gepulsten Strom, um Nanopulver schnell zu sintern, die Sinterzeit zu verkürzen, Kornwachstum zu hemmen und die Eigenschaften der Nanostruktur zu erhalten. Heißisostatisches Pressen (HIP) verbessert die Dichte weiter und beseitigt Mikroporen. Durch Präzisionsbearbeitung (wie Lasermikrobearbeitung) werden komplexe Formen erzielt, und die Oberflächenbehandlung verbessert die Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität. Der Herstellungsprozess erfordert eine strenge Kontrolle der Pulverreinheit und der Sinterbedingungen, um die Stabilität und Leistungskonsistenz der Nanostruktur sicherzustellen.

**Anwendungen und Vorteile** : Nanostrukturierte Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen bieten erhebliche Vorteile für hochpräzise Anwendungen. Im medizinischen Bereich werden nanostrukturierte Legierungen beispielsweise in Strahlentherapie-Kollimatorkomponenten eingesetzt, um die Strahlenabschirmung und die Maßgenauigkeit zu verbessern. Im elektronischen Informationsbereich eignen sich Nanolegierungen aufgrund ihrer hervorragenden Wärmeleitfähigkeit für die Wärmeableitung von Hochleistungsservern. Im Verteidigungsbereich können hochfeste Nanolegierungen in Raketen-Balancekomponenten eingesetzt werden, um die Schlagfestigkeit zu erhöhen. Optimierungspotenziale umfassen die Entwicklung effizienterer Nanopulver-Herstellungstechnologien, den Einsatz von Komposit- Nanobeschichtungen zur weiteren Leistungssteigerung oder die Kombination additiver Fertigung zur Herstellung komplexer Nanostrukturen. Die Herausforderung liegt in den hohen Kosten der Nanopulver und der Oxidationskontrolle während des Herstellungsprozesses, die den Einsatz automatisierter Anlagen und Online-Überwachungstechnologie zur Verbesserung der Produktionseffizienz erfordert.

### 10.2.2 Funktional gradierte Materialien

Funktional abgestufte Werkstoffe (FGMs) erreichen einen fließenden Übergang von hoher Dichte zu hoher Wärmeleitfähigkeit oder hoher Zähigkeit durch eine graduelle Verteilung der Zusammensetzung oder Struktur innerhalb von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen, um den Anforderungen multifunktionaler Komponenten gerecht zu werden. Die einheitliche Zusammensetzung herkömmlicher Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen schränkt ihre Anpassungsfähigkeit an komplexe Arbeitsbedingungen ein, während FGMs ihre Leistung durch ein Gradientendesign optimieren (z. B. einen graduellen Wechsel des Wolframgehalts von hoch nach niedrig oder eine bereichsweise Änderung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses).

Beispielsweise können oberflächennahe Bereiche mit hohem Kupfergehalt die Wärmeleitfähigkeit verbessern und eignen sich für die Wärmeableitung; innere Bereiche mit hohem Wolframgehalt sorgen für eine hohe Dichte, um die Gewichtsanforderungen zu erfüllen. Die nichtmagnetischen Eigenschaften von FGMs bleiben erhalten, wodurch sie sich für elektromagnetisch sensible Umgebungen eignen; die Gradientenstruktur verbessert zudem die Thermoschockbeständigkeit und die Schnittstellenhaftung und macht sie somit für Hochtemperatur- oder Hochspannungsszenarien geeignet.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Herstellungsverfahren** : FGM-Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen werden üblicherweise durch schichtweises Pulverschichten in Kombination mit Flüssigphasensintern oder additiver Fertigungstechnologie hergestellt. Durch schichtweises Pulverschichten entsteht eine Gradientenstruktur, indem Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver unterschiedlicher Zusammensetzung schichtweise in eine Form eingebracht werden (z. B. ein Gradient von einer wolframreichen zu einer kupferreichen Schicht). Anschließend wird durch Flüssigphasensintern eine Gradientenstruktur erzeugt. Temperatur und Atmosphäre müssen während des Sinterprozesses präzise kontrolliert werden, um die Grenzflächenhaftung zu gewährleisten. Additive Fertigungsverfahren (z. B. selektives Laserschmelzen, SLM) erzeugen direkt eine Gradientenstruktur durch schichtweises Auftragen von Pulvern unterschiedlicher Zusammensetzung, was sich für komplex geformte Teile eignet. Heißisostatisches Pressen verbessert die Dichte zusätzlich und eliminiert Mikroporen in der Gradientengrenzfläche. Präzisionsbearbeitung (z. B. CNC-Fräsen oder Elektrofunktensbearbeitung) erzielt eine präzise Geometrie, und Oberflächenbehandlungen (z. B. chemische Passivierung oder PVD-Beschichtung) verbessern die Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität. Der Vorbereitungsprozess erfordert eine Optimierung der Pulververteilung und der Sinterparameter, um Spannungskonzentrationen an der Gradientenschnittstelle zu vermeiden.

**Anwendungen und Vorteile** : Funktional gradierte Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen bieten erhebliche Vorteile in multifunktionalen Komponenten. Beispielsweise verbessert der hohe Kupferanteil an der Oberfläche im Wärmeableitungssubstrat von Batteriepacks für Fahrzeuge mit alternativer Antriebstechnik die Wärmeleitfähigkeit, während der hohe Wolframanteil im Inneren für strukturellen Halt sorgt. Bei Abschirmungen für medizinische Strahlentherapie optimiert die Gradientenstruktur Strahlenschutz und geringes Gewicht. Bei Düsenkomponenten für Luft- und Raumfahrtwaffen erhöht das Gradientendesign die Thermoschockbeständigkeit. Optimierungsansätze umfassen die Entwicklung präziserer Gradientensteuerungstechnologien (wie z. B. Multimaterial-3D-Druck), den Einsatz von Verbundbeschichtungen zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften oder die Optimierung der Gradientenverteilung durch Simulation. Die Herausforderungen liegen in den hohen Herstellungskosten und der Stabilität der Gradientenschnittstelle, die durch automatisierte Produktion und Online-Überwachung reduziert werden muss.

### 10.3 Grüne Fertigungstechnologie für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen

Die Herstellung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen erfordert energiereiche Pulvermetallurgieprozesse und chemische Behandlungen. Dabei können Abgase, flüssige Abfälle und feste Abfälle entstehen, die die Umwelt belasten. Grüne Fertigungstechnologien reduzieren die Umweltbelastung deutlich durch verbesserte Aufbereitungsprozesse und die Entwicklung effizienter Abfallrecyclingmethoden. Gleichzeitig verbessern sie die Ressourcennutzung und die Produktionseffizienz. Umweltfreundliche Aufbereitungsprozesse ermöglichen eine saubere Produktion durch optimierte Produktionsabläufe, reduzierten Einsatz schädlicher Chemikalien und geringeren Energieverbrauch. Abfallrecyclingtechnologien reduzieren Ressourcenverschwendung und Umweltverschmutzung durch das Recycling von Abfällen und Ausschussteilen in der Produktion. Diese Technologien erfüllen nicht nur die Anforderungen der Umweltvorschriften, sondern steigern auch die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wettbewerbsfähigkeit von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in Bereichen wie Medizin, Elektronik und Verteidigung und eröffnen neue Wege für eine nachhaltige Fertigung.

### 10.3.1 Umweltfreundliches Aufbereitungsverfahren

Das umweltfreundliche Herstellungsverfahren zielt darauf ab, einen sauberen und effizienten Herstellungsprozess zu schaffen, indem der Produktionsprozess der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung optimiert und so der Energieverbrauch, die Abgasemissionen und der Einsatz schädlicher Chemikalien reduziert werden. Herkömmliche Pulvermetallurgieverfahren umfassen Hochenergiesintern und chemische Reinigungsschritte, die oxidische Abgase oder saure Abfallflüssigkeiten erzeugen können. Das umweltfreundliche Herstellungsverfahren reduziert die Umweltbelastung durch den Einsatz von Niedrigenergie-Sintertechnologie, umweltfreundlichen Bindemitteln und sauberen Verarbeitungsmethoden erheblich. Die Niedrigenergie-Sintertechnologie verwendet schnelle Sintermethoden wie das Funkenplasmasintern (SPS), das durch gepulsten Strom und hohen Druck schnell erhitzt, um die Sinterzeit zu verkürzen und den Energieverbrauch zu senken, während Dichte und Leistung der Legierung erhalten bleiben. Grüne Bindemittel verwenden abbaubare oder ungiftige Materialien, um herkömmliche Paraffin- oder Polymerbinder zu ersetzen, die Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen beim Metallspritzguss (MIM) zu verringern und die Abgasverschmutzung beim Entfetten zu reduzieren. Saubere Verarbeitungsmethoden reduzieren schädliche Abfallflüssigkeiten während der Verarbeitung durch die Verwendung wasserbasierter Kühlmittel anstelle von ölbasierten Kühlmitteln und optimieren gleichzeitig Präzisionsbearbeitungsprozesse, um die Staub- und Abfallerzeugung zu reduzieren.

Umweltfreundliche Herstellungsverfahren legen einen Schwerpunkt auf die Kontrolle der Produktionsumgebung. Durch Sintern und Verarbeiten in hochreinem Inertgas oder Vakuum wird die Oxidation von Wolfram-, Nickel- und Kupferpulvern verhindert und die Bildung von Oxidabgasen reduziert. Die Abwasseraufbereitungsanlage sammelt und reinigt die Reinigungsflüssigkeit in der Produktion, um Wasserverschwendung und Umweltverschmutzung zu reduzieren. Die Prozessoptimierung umfasst zudem den Einsatz automatisierter Steuerungssysteme zur präzisen Steuerung von Sinter Temperatur und -atmosphäre, zur Verbesserung der Produktionskonsistenz und zur Reduzierung von durch Prozessfehler verursachtem Abfall. Der Vorteil umweltfreundlicher Herstellungsverfahren liegt darin, dass sie bei reduziertem Energieverbrauch und reduzierten Emissionen die hohe Dichte, Nichtmagnetizität und Wärmeleitfähigkeit der Legierung erhalten und so den Anforderungen an Abschirmungen in der medizinischen Strahlentherapie, elektronischen Wärmeableitungssubstraten und Gegengewichtskomponenten der Landesverteidigung gerecht werden. Zu den Optimierungsschwerpunkten gehören die Entwicklung effizienterer Schnellsintertechnologien, die Erforschung des Einsatzes biobasierter Bindemittel und die Integration intelligenter Fertigungssysteme zur weiteren Verbesserung der Produktionseffizienz.

### 10.3.2 Abfallrecyclingtechnologie

Reduziert Ressourcenverschwendung und Umweltverschmutzung und verbessert die Wirtschaftlichkeit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Nachhaltigkeit von Materialien durch das Recycling von Abfallmaterialien (wie Pulver, Spänen) und Ausschussteilen (wie medizinischen Abschirmteilen und Gegengewichten) bei der Herstellung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Herkömmliche Recyclingmethoden können energiereiches Schmelzen oder chemische Behandlung beinhalten, was zu Sekundärverschmutzung führt. Die Technologie des umweltfreundlichen Abfallrecyclings erreicht hohe Rückgewinnungsraten und geringe Umweltbelastung durch physikalische Trennung, chemische Reinigung und effiziente Wiederverwendungsprozesse. Bei der physikalischen Trennung werden die Wolfram-, Nickel- und Kupferkomponenten im Abfall zunächst durch mechanisches Mahlen und Sieben getrennt, wodurch der Bedarf an chemischer Behandlung reduziert wird. Bei der chemischen Reinigung werden umweltfreundliche Lösungsmittel (wie wasserbasierte Lösungen oder wenig giftige Säureflüssigkeiten) verwendet, um Metallkomponenten zu trennen und zu reinigen. Dadurch werden die Abgase und Abfallflüssigkeiten vermieden, die bei herkömmlichem Schmelzen mit starker Säure oder bei hohen Temperaturen entstehen. Der effiziente Wiederverwendungsprozess dosiert das zurückgewonnene Metallpulver für Pulvermetallurgie- oder MIM-Prozesse neu, um neue Legierungsteile herzustellen und die Leistungskonsistenz zu erhalten.

Die Abfallrecyclingtechnologie umfasst auch das Recycling von Altteilen. Durch Demontage und Sortierung von ausrangierten medizinischen Kollimatoren, elektronischen Kühlkörpern oder militärischen Gegengewichten werden verwertbare Wolfram-Nickel-Kupfer-Materialien gewonnen. Diese werden anschließend gereinigt, gemahlen und erneut gesintert, um sie in hochwertige Pulverrohstoffe umzuwandeln. Der Recyclingprozess muss in einer sauberen Umgebung durchgeführt werden, um Verunreinigungen zu vermeiden, die die amagnetische und biokompatible Wirkung der Legierung beeinträchtigen. Moderne Online-Überwachungstechnologie ermittelt Zusammensetzung und Reinheit des recycelten Pulvers und stellt so sicher, dass es den Produktionsstandards entspricht. Der Vorteil der Abfallrecyclingtechnologie besteht darin, dass sie die Abhängigkeit von primären Wolfram-, Nickel- und Kupfermineralien deutlich reduziert, die Umweltbelastung durch Abbau und Raffination verringert und die Ansammlung von Feststoffen reduziert. Optimierungspotenziale umfassen die Entwicklung effizienterer Trenntechnologien (wie elektromagnetische Sortierung oder Lasersortierung), die Erforschung geschlossener Recyclingkreisläufe und die Integration additiver Fertigungstechnologien, um recycelte Pulver direkt für die Herstellung komplexer Komponenten zu nutzen.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

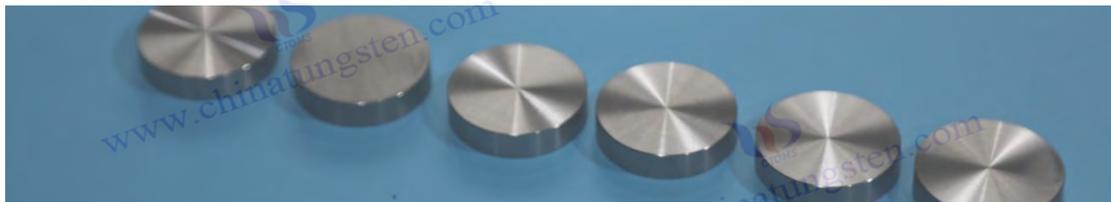
#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Kapitel 11 Häufige Probleme und Lösungen bei Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen finden aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften, ihrer hervorragenden Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, Medizin, Elektronik, Verteidigung und Energie. Die pulvermetallurgisch hergestellte Legierung vereint die hohe Dichte von Wolfram mit der Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Nickel-Kupfer-Bindungsphase und erfüllt so die Anforderungen hoher Präzision und rauer Umgebungen. Während des Herstellungsprozesses können jedoch verschiedene Probleme auftreten, wie Sinterfehler, ungleichmäßige Zusammensetzung oder Verarbeitungsschwierigkeiten, die die Leistung und Zuverlässigkeit der Legierung beeinträchtigen. Die Lösung dieser Probleme erfordert optimierte Prozessabläufe, eine verbesserte Anlagensteuerung und den Einsatz fortschrittlicher Technologien, um die hohe Qualität und Konsistenz der Legierung sicherzustellen.

### 11.1 Herstellungsverfahren der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

von Wolfram -Nickel-Kupfer-Legierungen erfolgt hauptsächlich in pulvermetallurgischen Verfahren, darunter Pulvermischen, Pressen, Sintern und Nachbearbeitung. Bei jedem dieser Prozesse können aufgrund ungeeigneter Rohstoffe, Geräte oder Prozessparameter Probleme auftreten. Das Sintern ist ein wichtiger Schritt und wirkt sich direkt auf die Dichte, Mikrostruktur und Leistung der Legierung aus, ist jedoch anfällig für Defekte wie Porosität, Risse oder Komponentenseigerung. Diese Probleme können zu verminderten mechanischen Eigenschaften, unzureichender Wärmeleitfähigkeit oder beeinträchtigten nichtmagnetischen Eigenschaften der Legierung führen und so ihre Anwendung in medizinischen Abschirmteilen, elektronischen Wärmeableitungssubstraten oder Gegengewichtskomponenten für die Landesverteidigung beeinträchtigen. Die Lösung der Probleme im Herstellungsprozess muss mit der Auswahl der Rohstoffe, der Prozessoptimierung und der Qualitätskontrolle beginnen, um sicherzustellen, dass die Leistung der Legierung den Anforderungen anspruchsvoller Anwendungen entspricht.

#### 11.1.1 Lösungen für Sinterdefekte

Sinterdefekte sind häufige Probleme bei der Herstellung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen und äußern sich hauptsächlich in Poren, Rissen, Entmischung oder ungleichmäßigem Sintern. Diese Defekte verringern die Dichte, die mechanischen Eigenschaften und die Wärmeleitfähigkeit der Legierung und beeinträchtigen ihre Zuverlässigkeit in hochpräzisen Anwendungen. Porosität entsteht meist durch unvollständiges Füllen der Zwischenräume zwischen Pulverpartikeln oder durch Restgase. Dies kann zu unzureichender Dichte führen und die Strahlenabschirmung bzw. den Gegengewichtseffekt schwächen. Risse entstehen oft durch thermische Spannungen oder eine ungleichmäßige Abkühlung während des Sinterns und beeinträchtigen die Zähigkeit und Haltbarkeit der Legierung. Entmischung entsteht durch eine ungleichmäßige Verteilung der Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver oder eine unzureichende Fließfähigkeit während des Flüssigphasensinterns. Dies kann zu inkonsistenten lokalen Eigenschaften wie reduzierter Wärmeleitfähigkeit oder beeinträchtigten nichtmagnetischen Eigenschaften führen. Ungleichmäßiges Sintern ist auf einen ungeeigneten Temperaturgradienten oder eine unzureichende

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Atmosphärenführung im Ofen zurückzuführen, die die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur der Legierung beeinträchtigen.

**Lösung** : Sinterdefekte lassen sich durch eine optimierte Rohstoffauswahl, einen verbesserten Sinterprozess und eine verstärkte Prozesskontrolle beheben. Verwenden Sie hochreine Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver mit gleichmäßiger Partikelgröße, um eine konsistente chemische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften der Pulver zu gewährleisten und Porosität und Entmischung zu reduzieren. Mischen Sie die Pulver mithilfe von Hochenergie-Kugelmahlen oder mechanischer Legierungstechnologie, um die Gleichmäßigkeit und Kontaktfläche der Partikel zu verbessern und die Benetzung und Füllung der Nickel- und Kupferphasen beim Flüssigphasensintern zu fördern. Optimieren Sie die Sinterprozessparameter, wenden Sie eine Sinterstrategie mit stufenweiser Temperaturerhöhung an und erhitzen Sie langsam auf die Flüssigphasensintertemperatur, damit die Nickel- und Kupferflüssigphase vollständig fließen, die Lücken zwischen den Wolframpartikeln füllen und die Porenbildung reduzieren kann. Kontrollieren Sie gleichzeitig die Abkühlrate, um durch thermische Spannung verursachte Risse zu vermeiden. Verwenden Sie zum Sintern hochreines Inertgas (z. B. Argon) oder eine Vakuumumgebung, um Oxidbildung zu verhindern und die nichtmagnetische und thermische Leitfähigkeit der Legierung zu erhalten. Führen Sie eine Schnellsinterstechnologie wie das Spark-Plasma-Sintern (SPS) ein, bei dem gepulster Strom und hoher Druck verwendet werden, um schnell zu erhitzen, die Sinterzeit zu verkürzen, das Kornwachstum zu hemmen und Porosität und Entmischung zu reduzieren.

Verstärkte Qualitätskontrolle während des Sinterprozesses. Ein Online-Überwachungssystem erfasst Temperatur, Atmosphäre und Druck im Ofen in Echtzeit und gewährleistet so die Stabilität der Sinterbedingungen. Heißeisostatisches Pressen dient als Nachbearbeitungsprozess, um durch hohe Temperaturen und hohen Druck Restporen und Mikrorisse weiter zu eliminieren und die Dichte und Gleichmäßigkeit der Legierung zu verbessern. Dies eignet sich besonders für anspruchsvolle Anwendungen wie medizinische Kollimatoren oder Gegengewichtskomponenten in der Luft- und Raumfahrt. Regelmäßige Kalibrierung der Sinteranlage sorgt für ein gleichmäßiges Temperaturfeld im Ofen und verhindert ungleichmäßiges Sintern durch lokale Überhitzung oder Kälte. Zusätzlich werden Simulationstechnologien eingesetzt, um Sinterparameter zu optimieren, den Flüssigphasenfluss und die Spannungsverteilung vorherzusagen und die Kosten für Versuch und Irrtum zu reduzieren. Der Vorteil dieser Lösung liegt in der deutlichen Verbesserung von Dichte, mechanischen Eigenschaften und Leistungskonstanz der Legierung, um die strengen Anforderungen der Medizin-, Elektronik- und Verteidigungsbranche zu erfüllen. Zu den Optimierungsansätzen gehören die Entwicklung effizienterer Schnellsinteranlagen, die Erforschung automatisierter Steuerungssysteme zur Verbesserung der Prozessstabilität und die Integration additiver Fertigungstechnologien zur direkten Herstellung komplexer Formen und zur Reduzierung nachfolgender Verarbeitungsfehler.

### 11.1.2 Kontrolle der Zusammensetzungsgleichmäßigkeit

Die Gleichmäßigkeit der Zusammensetzung ist eine häufige Herausforderung bei der Herstellung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Sie bezieht sich auf die ungleichmäßige Verteilung der Wolfram-, Nickel- und Kupferkomponenten in der Legierung, die zu lokalen Dichteunterschieden, verringerter

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeleitfähigkeit oder beeinträchtigten nichtmagnetischen Eigenschaften führen kann. Inhomogene Zusammensetzungen werden üblicherweise durch unzureichende Pulvermischung, unterschiedliche Partikelgrößen oder schlechte Fließfähigkeit beim Flüssigphasensintern verursacht. Die hohe Dichte von Wolfram führt zu leichter Ablagerung während der Pulvermischung, während die ungleichmäßige Verteilung der Nickel-Kupfer-Bindephase nach dem Sintern zu lokaler Entmischung führen kann, was die Leistungskonsistenz der Legierung beeinträchtigt. Beispielsweise kann eine ungleichmäßige Zusammensetzung bei Abschirmteilen für die medizinische Strahlentherapie die Strahlenschutzwirkung verringern; bei elektronischen Kühlkörpern kann sie eine instabile Wärmeleitfähigkeit verursachen und die Wärmeableitungseffizienz beeinträchtigen.

**Lösung** : Um eine gleichmäßige Zusammensetzung zu gewährleisten, kann dies durch eine optimierte Pulverauswahl, einen verbesserten Pulvermischprozess und eine verstärkte Sinterkontrolle erreicht werden. Wählen Sie hochreines Wolfram-, Nickel- und Kupferpulver mit gleichmäßiger Partikelgröße, um Partikelsedimentation und Schichtungsneigung zu reduzieren und eine gleichmäßige Mischungsbildung zu Beginn sicherzustellen. Verwenden Sie zum Mischen der Pulver eine Hochenergie-Kugelmühle oder mechanische Legierungstechnologie. Durch langfristiges, hochintensives Mahlen werden die Wolfram-, Nickel- und Kupferpartikel vollständig dispergiert, die Kontaktgleichmäßigkeit zwischen den Partikeln verbessert und das Eindringen von Verunreinigungen vermieden. Verwenden Sie dreidimensionale Pulvermischgeräte oder ultraschallunterstütztes Pulvermischen, um die Dispersion und Fließfähigkeit des Pulvers weiter zu verbessern und die Sedimentation zu reduzieren. Optimieren Sie den Flüssigphasensinterprozess und kontrollieren Sie das Schmelzen und Fließen der Nickel-Kupfer-Flüssigphase durch eine stufenweise Heizstrategie, um sicherzustellen, dass die Wolframpartikel vollständig benetzt, die Lücken zwischen den Partikeln gefüllt und die Entmischung reduziert werden. Verwenden Sie während des Sinterprozesses hochreines Inertgas oder eine Vakuumumgebung, um zu verhindern, dass durch Kupferoxidation ein Ungleichgewicht der Zusammensetzung entsteht.

Eine verbesserte Prozesskontrolle ist der Schlüssel zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Zusammensetzung. Ein Online-Überwachungssystem erfasst den Pulvermischungsgrad und die Zusammensetzungsverteilung während des Sinterns in Echtzeit. Die Gleichmäßigkeit wird mittels Röntgenfluoreszenzanalyse oder Elektronenmikroskopie überprüft. Heißisostatisches Pressen (HIP) ist ein Nachbearbeitungsprozess, der durch hohe Temperaturen und hohen Druck lokale Entmischungen und Mikroporen beseitigt, die Dichte und Zusammensetzungskonsistenz der Legierung verbessert und sich besonders für hochpräzise Anwendungen wie Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt oder medizinische Kollimatoren eignet. Die regelmäßige Kalibrierung der Pulvermisch- und Sinteranlagen gewährleistet stabile Prozessparameter und vermeidet durch Geräteabweichungen bedingte Inhomogenitäten in der Zusammensetzung. Zusätzlich wird Simulationstechnologie eingesetzt, um die Pulvermisch- und Sinterparameter zu optimieren, Flüssigkeitsfluss und Zusammensetzungsverteilung vorherzusagen und die Testkosten zu senken. Der Vorteil dieser Lösung liegt in einer deutlich verbesserten Leistungskonsistenz der Legierung, um die hohen Anforderungen der Medizin-, Elektronik- und Verteidigungsbranche zu erfüllen. Zu den Optimierungsrichtungen gehören die Entwicklung eines automatisierten Pulvermischsystems, die Untersuchung von Pulvern im Nanomaßstab zur weiteren Verbesserung der Gleichmäßigkeit und die Integration additiver Fertigungstechnologien zur direkten

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Steuerung der Zusammensetzungsverteilung.

## 11.2 Anwendungsfehleranalyse von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen können in anspruchsvollen Anwendungen (wie z. B. in der medizinischen Strahlentherapie, in elektronischen Wärmeableitungssubstraten und in Gegengewichtskomponenten für Verteidigungszwecke) aufgrund von Materialfehlern, Umwelteinflüssen oder unsachgemäßer Verwendung versagen, was zu Leistungseinbußen oder Komponentenschäden führen kann. Anwendungsfehler können sich in unzureichenden mechanischen Eigenschaften, verringerter Wärmeleitfähigkeit, Oberflächenkorrosion oder Dimensionsinstabilität äußern und die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Geräte beeinträchtigen. Beispielsweise können Fehler bei medizinischen Geräten zu einer verringerten Strahlenschutzwirkung führen; bei elektronischen Geräten können Überhitzungsfehler auftreten; bei Verteidigungsgeräten können die Genauigkeit des Gegengewichts oder die Schlagfestigkeit beeinträchtigt sein. Die Analyse der Fehlerursachen und die Entwicklung von Lösungsansätzen sind der Schlüssel zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von Legierungsanwendungen, beginnend bei der Materialvorbereitung, der Anpassungsfähigkeit an die Umgebungsbedingungen und den Einsatzbedingungen.

**Fehlerursachen und -lösungen** : Häufige Ursachen für Anwendungsfehler sind Herstellungsfehler, Umwelterosion und mechanische Überlastung. Herstellungsfehler wie Poren, Risse oder eine ungleichmäßige Zusammensetzung beeinträchtigen die mechanischen Eigenschaften und die Wärmeleitfähigkeit der Legierung unmittelbar. Fehler können durch einen optimierten Sinterprozess (z. B. Funkenplasmasintern) oder durch heißostatisches Pressen, um eine dichte und gleichmäßige Mikrostruktur zu gewährleisten, behoben werden. Umwelterosion wird hauptsächlich durch Feuchtigkeit, chemische Desinfektion oder Hochtemperaturoxidation verursacht und führt zu Oberflächenkorrosion oder Leistungseinbußen, insbesondere bei medizinischen Geräten oder im Meeresbereich. Lösungen umfassen korrosionsbeständige Oberflächenbehandlungen wie PVD- TiN- Beschichtungen oder chemische Passivierung zur Bildung einer dichten Schutzschicht zur Verbesserung der Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit. Gleichzeitig kann die Optimierung der Legierungszusammensetzung und die Erhöhung des Nickel-Kupfer-Verhältnisses die Korrosionsbeständigkeit verbessern. Mechanische Überlastung tritt häufig bei starken Stößen oder Vibrationen auf (z. B. bei Raketengegengewichten oder Panzerungen), was zu Rissen oder Verformungen führen kann. Die Schlagfestigkeit kann durch Verbesserung der Legierungszähigkeit (z. B. durch Verwendung eines nanostrukturierten Designs) oder Optimierung der Komponentengeometrie (z. B. Hinzufügen von Rundungen oder Gradientenstrukturen) erhöht werden.

Die Anpassungsfähigkeit an die Umgebungsbedingungen steht im Mittelpunkt der Fehleranalyse. In Umgebungen mit hohen Temperaturen oder thermischen Zyklen kann thermische Spannung zu Dimensionsinstabilität oder Ablösung der Grenzfläche führen und so die Leistung von Wärmeableitungssubstraten oder Abschirmkomponenten beeinträchtigen. Lösungen umfassen die Verwendung von Formulierungen mit niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten in Kombination mit funktionellen Gradientenmaterialien (FGM) zur Optimierung der thermischen Spannungsverteilung.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektromagnetische Störungen können zu nichtmagnetischen Ausfällen führen, insbesondere bei MRT-Geräten oder Radarsystemen. Dies kann durch eine strenge Kontrolle des Eisenverunreinigungsgehalts und Online-Magnetisierungstests verhindert werden. Unsachgemäße Verwendung, wie z. B. Überlastung oder eine nicht den Konstruktionsanforderungen entsprechende Installation, kann zu Komponentenausfällen führen. Menschliche Fehler müssen durch Benutzerschulungen und standardisierte Installationsprozesse reduziert werden. Die Qualitätskontrolle nutzt Rasterelektronenmikroskopie zur Analyse der Mikrostruktur, Salzsprühtests zur Überprüfung der Korrosionsbeständigkeit und Vibrationstests zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften, um sicherzustellen, dass die Komponenten den Anwendungsstandards entsprechen. Der Vorteil dieser Lösung liegt in der umfassenden Verbesserung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Legierung, um den hohen Anforderungen in den Bereichen Medizin, Elektronik und Verteidigung gerecht zu werden. Zu den Optimierungsrichtungen gehören die Entwicklung selbstheilender Beschichtungen zur Bewältigung umweltbedingter Erosion, die Erforschung intelligenter Überwachungstechnologien zur Echtzeiterkennung von Ausfallrisiken und die Integration additiver Fertigungstechnologien zur Anpassung ausfallsicherer Strukturen.

### 11.2.1 Lösungen für thermische Zyklusfehler

Thermozyklusversagen ist eine häufige Ausfallart von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in Umgebungen mit hohen Temperaturen oder Temperaturunterschieden. Es äußert sich in Mikrorissen, Ablösen der Grenzfläche oder Dimensionsverformungen durch wiederholte Wärmeausdehnung und -kontraktion und beeinträchtigt die strukturelle Integrität und Leistungsstabilität der Legierung. Thermozyklusversagen wird hauptsächlich durch thermische Spannung verursacht. Wenn die Legierung im Hochtemperaturbetrieb oder in Umgebungen mit extremen Temperaturunterschieden schnellen Temperaturschwankungen ausgesetzt ist, kommt es aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten zu Spannungskonzentrationen im Material oder an der Grenzfläche zur Matrix, die zu Rissausbreitung oder Komponentenversagen führen können. Beispielsweise kann in der Detektorabschirmung eines medizinischen CT-Geräts thermisches Zyklieren zu einer Verformung der Abschirmkomponente führen und die Strahlenschutzwirkung verringern.

**Lösung** : Thermozyklusfehler können durch Optimierung der Legierungszusammensetzung, Verbesserung der Mikrostruktur und Einsatz moderner Verfahren behoben werden. Passen Sie das Nickel-Kupfer-Verhältnis an und erhöhen Sie den Kupfergehalt, um die Wärmeleitfähigkeit zu verbessern, die Wärmeableitung zu beschleunigen, lokale Temperaturunterschiede zu verringern und die thermische Spannungsakkumulation zu reduzieren. Verwenden Sie ein Design mit funktionalem Gradientenmaterial (FGM), um die Anpassung des Wärmeausdehnungskoeffizienten zu optimieren und Grenzflächenspannungen abzubauen, indem Sie eine allmähliche Verteilung der Wolfram-, Nickel- und Kupfergehalte innerhalb der Legierung einführen. Dies eignet sich besonders für Wärmeableitungssubstrate oder Abschirmteile in Kombination mit Silizium, Keramik und anderen Substraten. Führen Sie nanostrukturierte Legierungen ein und nutzen Sie die korngrenzenverstärkende Wirkung von Nanopartikeln, um die Wärmeermüdungsbeständigkeit zu verbessern und die Bildung von Mikrorissen zu verringern. Optimieren Sie den Sinterprozess und verwenden Sie Funkenplasmasintern

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(SPS), um schnell eine dichte Struktur zu bilden und Poren und Spannungskonzentrationspunkte zu reduzieren; heißisostatisches Pressen (HIP) beseitigt Mikroporen zusätzlich und verbessert die Thermoschockbeständigkeit der Legierung.

Die Oberflächenbehandlung ist eine wichtige Maßnahme zur Vermeidung von Temperaturwechselschäden. Das Aufbringen von Hochleistungsbeschichtungen zur Bildung einer Wärmedämmschicht kann die Auswirkungen von Thermoschocks auf die Legierungsoberfläche reduzieren und gleichzeitig die Grenzflächenbindungskraft erhöhen, um ein Ablösen zu verhindern. Optimieren Sie die Bauteilgeometrie, beispielsweise durch die Erhöhung von Hohlkehlen oder die Erhöhung der Gradientendicke, um thermische Spannungen zu verteilen und das Rissrisiko zu reduzieren. Die Qualitätskontrolle simuliert reale Einsatzbedingungen durch Temperaturwechseltests, kombiniert mit Rasterelektronenmikroskopie, um Mikrorisse zu analysieren und die thermische Stabilität der Legierung zu überprüfen. Der Vorteil dieser Lösung liegt in der deutlich verbesserten Zuverlässigkeit der Legierung in Umgebungen mit hohen Temperaturen und Temperaturunterschieden, wodurch die strengen Anforderungen der Medizin-, Elektronik- und Luft- und Raumfahrtbranche erfüllt werden. Zu den Optimierungsschwerpunkten gehören die Entwicklung adaptiver Beschichtungen zur dynamischen Entlastung thermischer Spannungen und die Erforschung der 3D-Drucktechnologie zur Herstellung komplexer Gradientenstrukturen.

### 11.2.2 Korrosionsschutz gegen Umwelteinflüsse

Umweltbedingte Korrosion ist eine häufige Ausfallursache von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in feuchten, chemisch sterilisierten oder hochtemperaturoxidierenden Umgebungen. Sie äußert sich in Oberflächenoxidation, Korrosionsnarben oder Materialzersetzung und beeinträchtigt die Leistung und Lebensdauer der Legierung. Korrosion wird hauptsächlich durch Umweltfaktoren wie Feuchtigkeit, Salznebel oder chemische Reinigungsmittel verursacht, insbesondere bei medizinischen Geräten (häufige Desinfektion erforderlich), in Meeresumgebungen (z. B. Radargegengewichten auf Schiffen) oder bei Hochtemperaturanwendungen (z. B. Raketendüsenkomponenten). Kupfer als Bindephease ist anfällig für Oxidation oder chemische Angriffe, was zu Oberflächenrauheit, verringerter Wärmeleitfähigkeit oder beeinträchtigten nichtmagnetischen Eigenschaften führt. Beispielsweise kann Korrosion bei Abschirmungen für medizinische Strahlentherapie die Strahlenschutzwirkung verringern; bei Gegengewichten für Motoren von Fahrzeugen mit alternativer Energie kann sie Oberflächenverschleiß verursachen und das dynamische Gleichgewicht beeinträchtigen.

**Lösung** : Umweltbedingte Korrosion kann durch Optimierung der Legierungszusammensetzung, das Aufbringen von Schutzbeschichtungen und verbessertes Umweltmanagement vermieden werden. Eine Erhöhung des Nickelgehalts oder ein optimiertes Nickel-Kupfer-Verhältnis kann die Korrosionsbeständigkeit der Verbindungsphase verbessern und die Oxidationsneigung von Kupfer in feuchten oder chemischen Umgebungen verringern. Oberflächenbehandlungstechnologien wie PVD-TiN- oder CrN-Beschichtungen bilden eine dichte Schutzschicht, die Sauerstoff, Feuchtigkeit und Chemikalien abschirmt und so die Korrosionsbeständigkeit deutlich verbessert. Eine chemische Passivierung kann die Oxidationsbeständigkeit und Biokompatibilität zusätzlich verbessern, indem sie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

einen oxidischen Schutzfilm auf der Oberfläche bildet. Dieser eignet sich für medizinische Prothesen oder chirurgische Navigationskomponenten. Elektrochemisches Polieren optimiert die Oberflächenbeschaffenheit, reduziert Korrosionsansatzpunkte und verbessert die Korrosionsbeständigkeit.

Optimieren Sie den Herstellungsprozess, um die Korrosionsempfindlichkeit zu reduzieren. Verwenden Sie hochreine Rohstoffe und eine saubere Sinterumgebung (z. B. Vakuum oder hochreines Argon), um das Eindringen von Verunreinigungen (wie Eisen oder Sauerstoff) zu verhindern und die nichtmagnetischen und korrosionsbeständigen Eigenschaften der Legierung zu erhalten. Heißisostatisches Pressen (HIP) erhöht die Dichte der Legierung und reduziert die Entstehung von Poren als Ausgangspunkt für Korrosion. Optimieren Sie das Management der Einsatzumgebung, z. B. durch die Verwendung neutraler Desinfektionsmittel anstelle von stark sauren und alkalischen Reinigern in medizinischen Geräten, um chemische Korrosion zu reduzieren. Kombinieren Sie das Dichtungsdesign in Meeresumgebungen, um Salznebel und Feuchtigkeit zu isolieren. Die Qualitätskontrolle überprüft die Korrosionsbeständigkeit durch Salzsprühtests, Nass-Wärme-Zyklustests und Oberflächenanalysen (SEM oder XPS), um die Einhaltung medizinischer und militärischer Standards sicherzustellen. Der Vorteil dieser Lösung besteht darin, dass sie die Lebensdauer der Legierung in rauen Umgebungen deutlich verlängert und die Zuverlässigkeitsanforderungen der Bereiche Medizin, Elektronik und Verteidigung erfüllt. Zu den Optimierungsrichtungen gehören die Entwicklung selbstheilender Beschichtungen zur dynamischen Reparatur von Korrosionsschäden, die Erforschung von Nanokompositbeschichtungen zur Verbesserung der Schutzeffizienz und die Integration von Online-Überwachungstechnologie zur Bewertung des Korrosionsstatus in Echtzeit.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### 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)

## Anhang

### Terminologie für Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen

Der Begriff	Definition und Erklärung
<b>Pulvermetallurgie</b>	Verfahren zur Herstellung metallischer Werkstoffe durch Mischen, Pressen und Sintern von Metallpulvern zur Herstellung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen, wobei eine hohe Dichte und eine homogene Mikrostruktur gewährleistet werden.
<b>Flüssigphasensintern</b>	Während des Sinterprozesses schmilzt die Nickel-Kupfer-Phase bei hohen Temperaturen und bildet eine Flüssigkeit, die die Wolframpartikel benetzt und die Lücken füllt, wodurch die Dichte und Leistung der Legierung verbessert wird.
<b>Heißisostatisches Pressen (HIP)</b>	Ein Verfahren, bei dem Legierungen bei hoher Temperatur und hohem Druck unter omnidirektionalem Druck behandelt werden, um Mikroporen und Defekte zu beseitigen und die Dichte und mechanischen Eigenschaften zu verbessern.
<b>Metallspritzguss (MIM)</b>	Ein Verfahren zur Herstellung komplex geformter, hochpräziser Teile durch Mischen von Metallpulver mit einem Bindemittel, Entbindern und Sintern nach dem Spritzgießen, geeignet für Miniaturisierungsanwendungen.
<b>Hohe Dichte</b>	Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen zeichnen sich durch eine hohe Masse pro Volumeneinheit aus, wodurch sie sich für Gegengewichts- und Abschirmanwendungen eignen, beispielsweise als Abschirmteile für die medizinische Strahlentherapie und als Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt.
<b>Nicht magnetisch</b>	Die Legierung erzeugt keine Magnetfelder und wird durch Magnetfelder nicht gestört, sodass sie sich für elektromagnetisch empfindliche Umgebungen wie MRT-Geräte und Radarsysteme eignet.
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	Aufgrund der Wärmeübertragungsfähigkeit der Legierung und der Zugabe der Kupferphase eignet sie sich hervorragend für Wärmeableitungsanwendungen (wie etwa elektronische Kühlkörper, Batteriesubstrate).
<b>Niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient</b>	Die geringe Maßänderung der Legierung bei Temperaturschwankungen gewährleistet geometrische Stabilität während thermischer Zyklen und eignet sich für hochpräzise Bauteile.
<b>Funktional abgestufte Materialien (FGM)</b>	Materialien mit optimierter Leistung durch Kompositions- oder Strukturgradientendesign, wie beispielsweise die Kombination eines Kerns mit hoher Dichte und einer Oberflächenschicht mit hoher Wärmeleitfähigkeit.
<b>Nanostrukturierte Legierungen</b>	Die Legierung besteht aus Nanopulver und hat eine feinkörnige Struktur, die Festigkeit, Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit verbessert.
<b>Sinterfehler</b>	Die beim Sinterprozess entstehenden Poren, Risse oder Bauteilseigerungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	beeinträchtigen die Leistung und können durch Prozessoptimierung und Nachbehandlung behoben werden.
<b>Einheitlichkeit der Zusammensetzung</b>	Die gleichmäßige Verteilung von Wolfram, Nickel und Kupfer in der Legierung gewährleistet eine gleichbleibende Leistung, die durch Hochenergie-Kugelmahlen und Online-Überwachung kontrolliert wird.
<b>Thermocycling-Fehler</b>	Durch wiederholte Temperaturänderungen verursachte Risse oder Grenzflächenablösungen können durch Gradientendesign und -beschichtung gemildert werden.
<b>Umweltkorrosion</b>	Korrosionsbeständige Beschichtungen und Komponenten können Oberflächen optimal vor Oxidation oder Verschlechterung durch feuchte oder chemische Umgebungen schützen.
<b>Biokompatibilität</b>	Da es bei Kontakt mit menschlichem Gewebe keine Nebenwirkungen hervorruft, eignet es sich für medizinische Anwendungen wie Prothesen und chirurgische Navigationskomponenten.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Chinesische Referenzen

- [1] Zhang Li, Wang Yong. Herstellung und Leistungsforschung von Wolfram-basierten hochdichten Legierungen. Journal of Materials Science and Engineering, 2019.
- [2] Li Xiao, Liu Zhi. Anwendungsfortschritte von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in der elektronischen Wärmeableitung. Electronic Materials and Technology, 2020.
- [3] Chen Hui, Zhao Ming. Anwendung grüner Fertigungstechnologie in der Wolframlegierungsproduktion. China Materials Progress, 2021.
- [4] Wang Qiang, Zhang Hua. Herstellung und Leistungsoptimierung von nanostrukturierter Wolframlegierung. Nanotechnology and Precision Engineering, 2022.
- [5] Sun Wei, Li Qiang. Anwendung von funktionalen Gradientenmaterialien in hochpräzisen Wolframlegierungskomponenten. Journal of Composite Materials, 2023.
- [6] Liu Yang, Zhang Wei. Forschung zur Strahlenabschirmung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in medizinischen Geräten. Medical Device Research, 2021.
- [7] Zhou Ping, Xu Feng. Anwendung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen in Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt. Journal of Aeronautical Materials, 2020.
- [8] Yang Fan, Wang Lei. Strategie zur Kontrolle von Sinterdefekten bei der Herstellung von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Powder Metallurgy Technology, 2022.
- [9] Zhang Tao, Li Na. Abfallverwertungs- und Recyclingtechnologie von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen. Kreislaufwirtschaft und Materialien, 2023.
- [10] He Ming, Sun Li. Anwendung und Herausforderungen von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen im Bereich der Landesverteidigung und Militärindustrie. Nationale Verteidigungstechnologie, 2021.

## Englische Referenzen

- [1] Smith, J., & Brown, T. Hochdichte Legierungen für Luft- und Raumfahrt und medizinische Anwendungen. Journal of Materials Science, Springer, 2020.
- [2] Zhang, L., & Wang, Y. Fortschritte in der Pulvermetallurgie für Wolfram-basierte Legierungen. Materials Today, Elsevier, 2019.
- [3] Kumar, R., & Singh, A. Nichtmagnetische Wolframlegierungen in elektromagnetischen Umgebungen. Journal of Applied Physics, AIP Publishing, 2021.
- [4] Li, X., et al. Wärmemanagementmaterialien für Elektronik- und Energieanwendungen. Advanced Materials Research, Wiley, 2022.
- [5] Chen, H., & Liu, Z. Grüne Fertigungstechniken für Hochleistungslegierungen. Nachhaltige Materialien und Technologien, Elsevier, 2023.
- [6] Wang, Q., & Zhao, M. Funktionale Gradientenmaterialien in hochpräzisen Anwendungen. Composites Science and Technology, Elsevier, 2021.
- [7] Lee, S., et al. Nanostrukturierte Wolframlegierungen für extreme Umgebungen. Nanotechnology Reviews, De Gruyter, 2023.
- [8] Johnson, P., & Taylor, R. Wolframlegierungen in der Strahlenabschirmung für medizinische Geräte. Medizinische Physik, AAPM, 2020.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT