

## Was ist eine Wolfram-Nickel-Eisen-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 Grundkenntnisse über Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen

- 1.1 Definition der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung
- 1.2 Zusammensetzung der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung
  - 1.2.1 Eigenschaften und Funktionen von Wolfram
  - 1.2.2 Eigenschaften und Funktionen von Nickel
  - 1.2.3 Eigenschaften und Funktionen von Eisen
- 1.3 Historischer Hintergrund und Entwicklung der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung
  - 1.3.1 Entdeckung der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung
  - 1.3.2 Frühe Anwendungen und technologische Fortschritte

### Kapitel 2 Physikalische und chemische Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

- 2.1 Dichte und mechanische Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung
  - 2.1.1 Eigenschaften hoher Dichte
  - 2.1.2 Zugfestigkeit und Zähigkeit
  - 2.1.3 Härte und Verschleißfestigkeit
- 2.2 Thermische Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung
  - 2.2.1 Schmelzpunkt und thermische Stabilität
  - 2.2.2 Wärmeausdehnungskoeffizient
  - 2.2.3 Wärmeleitfähigkeit
- 2.3 Chemische Stabilität der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung
  - 2.3.1 Korrosionsbeständigkeit
  - 2.3.2 Antioxidative Eigenschaften
  - 2.3.3 Chemische Reaktionen mit anderen Materialien
- 2.4 Elektromagnetische und andere besondere Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung
  - 2.4.1 Magnetische Eigenschaften
  - 2.4.2 Leitfähigkeit
  - 2.4.3 Spezifischer Widerstand
  - 2.4.4 Strahlungsbeständigkeit
- 2.5 CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung MSDS

### Kapitel 3 Herstellung und Verarbeitung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen

- 3.1 Rohstoffauswahl und Vorbehandlung
  - 3.1.1 Reinheitsanforderungen für Wolfram, Nickel und Eisen
  - 3.1.2 Rohstoffvorbehandlungsprozess
- 3.2 Herstellungsverfahren für Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen
  - 3.2.1 Pulvermetallurgie
  - 3.2.2 Flüssigphasensinter-technologie
  - 3.2.3 Additive Fertigungstechnologie (3D-Druck)
  - 3.2.4 Weitere Präparationstechniken
- 3.3 Verarbeitungstechnologie der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3.1 Bearbeitung
- 3.3.2 Wärmebehandlungstechnologie
- 3.3.3 Oberflächenbehandlung und Beschichtungstechnik

#### **Kapitel 4 Qualitätskontrolle und Inspektion von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen**

- 4.1 Zusammensetzungsanalyse der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung
  - 4.1.1 Methode zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung
  - 4.1.2 Mikrostrukturanalyse
- 4.2 Leistungstest der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung
  - 4.2.1 Prüfung der mechanischen Eigenschaften
  - 4.2.2 Thermische Leistungsprüfung
  - 4.2.3 Elektrische Leistungsprüfung
  - 4.2.4 Magnetische Leistungsprüfung
- 4.3 Qualitätszertifizierung und -standards
  - 4.3.1 Chinesischer Nationalstandard für Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen
  - 4.3.2 Internationale Normen für Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen
  - 4.3.3 Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungsnormen in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern der Welt

#### **Kapitel 5 Anwendungsgebiete der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung**

- 5.1 Anwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie
  - 5.1.1 Ausgleichsmaterialien
  - 5.1.2 Hochtemperaturbeständige Teile
- 5.2 Verteidigung und Militär
  - 5.2.1 Panzerbrechende Materialien
  - 5.2.2 Schutzpanzerung
- 5.3 Anwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen im medizinischen Bereich
  - 5.3.1 Abschirmkomponenten für CT-/MRT-Geräte
  - 5.3.2 Kollimatoren für Strahlentherapiegeräte
  - 5.3.3 Präzisionsmedizinprodukte
  - 5.3.4 Gelenkgegengewichte für Chirurgieroboter
  - 5.3.5 Mikrogewichte für die interventionelle Therapie
- 5.4 Anwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in Präzisionsinstrumenten
  - 5.4.1 Präzisionsinstrumenten-Gegengewichte
  - 5.4.2 Balance-Block der Lithografieplattform
  - 5.4.3 Dämpfungsblock für Hochgeschwindigkeits-Werkzeugmaschinen spindeln
  - 5.4.4 Komponenten zur Vibrationsreduzierung bei Präzisionsoptikplattformen
- 5.5 Weitere Anwendungen von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen
  - 5.5.1 Anwendung der 3D-Drucktechnologie
  - 5.5.2 Potenziale im Energiesektor
  - 5.5.3 Golfschlägergewichte
  - 5.5.4 Rennmotor-Auswuchsatz

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

## Kapitel 6: Vorteile und Nachteile von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen

### 6.1 Analyse der Vorteile der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

#### 6.1.1 Hohe Dichte und Festigkeit

#### 6.1.2 Verarbeitungsleistung

### 6.2 Einschränkungen der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

#### 6.2.1 Kosten- und Ressourcenbeschränkungen

#### 6.2.2 Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit

### 6.3 Vergleich von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen und anderen Werkstoffen

#### 6.3.1 Vergleich mit Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

#### 6.3.2 Vergleich mit bleibasierten Legierungen

#### 6.3.3 Vergleich mit anderen hochdichten Werkstoffen

## Kapitel 7: Umweltauswirkungen der Produktion und Verwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen

### 7.1 Umweltauswirkungen während der Produktion

#### 7.1.1 Rohstoffgewinnung und Energieverbrauch

#### 7.1.2 Abfall und Emissionen

### 7.2 Grüne Fertigungstechnologie

#### 7.2.1 Umweltfreundliche Aufbereitungsmethode

#### 7.2.2 Energiespartechnologien

### 7.3 Recycling und Wiederverwendung

#### 7.3.1 Technologie zur Legierungsrückgewinnung

#### 7.3.2 Rollen in der Kreislaufwirtschaft

## Kapitel 8: Häufig gestellte Fragen und Antworten

### 8.1 Häufige Missverständnisse über Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen

### 8.2 Häufige Probleme in Technik und Anwendung

### 8.3 Expertenrat und Lösungen

## Anhang:

Glossar der Begriffe zu Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen

Verweise



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung Bild

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

**CTIA GROUP LTD**  
**Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction**

**1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy**

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

**2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy**

**High Density:** Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm<sup>3</sup>.

**High Strength:** Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

**Other Characteristics:** Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

**3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades**

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
<b>Composition (%)</b>	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
<b>Density (g/cm<sup>3</sup>)</b>	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
<b>Heat Treatment</b>	Sintering						
<b>Tensile Strength (PSI)</b>	900~1000		900~1100		920~1100		
<b>Elongation (%)</b>	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
<b>Hardness (HRC)</b>	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

**4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy**

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

**4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy**

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

**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)

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Kapitel 1 Grundkenntnisse über Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen

### 1.1 Definition der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist ein hochdichtes Legierungsmaterial mit Wolfram als Hauptbestandteil und Nickel und Eisen als Bindephase. Sie wird üblicherweise als hochdichte Legierung klassifiziert. Aufgrund ihrer hervorragenden physikalischen und chemischen Eigenschaften findet diese Legierung breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin, der Nuklearindustrie und im zivilen Bereich. Die Definition der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung leitet sich von ihren Hauptbestandteilen und deren einzigartiger Kombination von Eigenschaften ab: Wolfram sorgt für hohe Dichte und Festigkeit, während Nickel und Eisen als Bindemittel die Zähigkeit und Bearbeitbarkeit der Legierung verbessern.

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen haben üblicherweise eine Dichte von 16,5–18,75 g/cm<sup>3</sup> und kommen damit der Dichte von Edelmetallen wie Gold oder Platin nahe. Daher werden sie häufig als Ersatzwerkstoffe eingesetzt. Zu ihren Hauptmerkmalen zählen hohe Dichte, hohe Temperaturbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit und gute Bearbeitbarkeit. Im Vergleich zu anderen hochdichten Werkstoffen sind Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen kostengünstiger, insbesondere bei Anwendungen, bei denen hohes Gewicht auf kleinem Raum konzentriert werden muss, wie z. B. bei Gegengewichten, Strahlenschutzmaterialien und militärischen panzerbrechenden Geschossen.

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen werden üblicherweise durch pulvermetallurgisches Verfahren hergestellt. Dabei werden hochreines Wolframpulver, Nickelpulver und Eisenpulver in einem bestimmten Verhältnis gemischt, gepresst und geformt sowie bei hohen Temperaturen gesintert, um eine dichte Legierungsstruktur zu bilden. Während des Sinterprozesses bilden Nickel und Eisen eine flüssige Phase, die die Bindung der Wolframpartikel fördert und der Legierung so hervorragende mechanische Eigenschaften verleiht. Das Zusammensetzungsverhältnis der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung kann je nach Verwendungszweck angepasst werden, beispielsweise durch Erhöhung des Nickelanteils zur Verbesserung der Zähigkeit oder durch Anpassung des Eisengehalts zur Kostenoptimierung.

Aus Anwendungssicht wird Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung aufgrund ihrer hohen Dichte und Festigkeit häufig für Gegengewichtskomponenten in der Luft- und Raumfahrt verwendet, beispielsweise als Ausgleichsgewicht eines Flugzeugs oder als Rotorgegengewicht eines Hubschraubers. Im medizinischen Bereich wird Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung aufgrund ihrer hervorragenden Strahlenschutzigenschaften zur Herstellung von Röntgen- und Gammastrahlenschutzrüstung verwendet. Im militärischen Bereich wird Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung aufgrund ihrer hohen Dichte und Härte häufig zur Herstellung panzerbrechender Kerne verwendet, die gepanzerte Ziele effektiv durchdringen können.

### 1.2 Zusammensetzung der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen bestehen hauptsächlich aus drei Elementen: Wolfram (W), Nickel

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Ni) und Eisen (Fe). Wolfram dominiert dabei mit 85–95 %, während Nickel und Eisen als Bindephasen jeweils 5–15 % ausmachen. Je nach Anwendung können der Legierung zusätzlich Spuren anderer Elemente wie Kupfer, Kobalt oder Molybdän zugesetzt werden, um die Leistung weiter zu optimieren. Das Zusammensetzungsverhältnis der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung beeinflusst direkt ihre physikalischen Eigenschaften (wie Dichte, Härte und Zähigkeit) und die Verarbeitungseigenschaften. Daher muss in der Produktion der Anteil jedes Elements entsprechend den Anwendungsanforderungen präzise gesteuert werden.

Wolfram ist der Kernbestandteil der Legierung und sorgt für eine hohe Dichte (19,25 g/cm<sup>3</sup>) und einen hohen Schmelzpunkt (3410 °C). Damit eignet es sich ideal für hochdichte Legierungen. Nickel als Hauptbindemittel weist eine gute Duktilität und Korrosionsbeständigkeit auf und kann während des Sinterprozesses eine flüssige Phase bilden, die die Bindung der Wolframpartikel fördert und so die Gesamtfestigkeit und Zähigkeit der Legierung verbessert. Eisen verbessert die mechanischen Eigenschaften der Legierung zusätzlich und senkt gleichzeitig die Produktionskosten. Der synergistische Effekt von Nickel und Eisen verleiht Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen eine gute Zerspanbarkeit und Schlagfestigkeit bei gleichbleibend hoher Dichte.

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen werden üblicherweise in Gewichtsprozent angegeben. Beispielsweise besteht die gängige Legierung 90W-7Ni-3Fe aus 90 % Wolfram, 7 % Nickel und 3 % Eisen. Dieses Verhältnis ermöglicht eine ausgewogene Kombination aus hoher Dichte und mechanischen Eigenschaften und eignet sich für vielfältige Anwendungsszenarien. Zu beachten ist, dass das Nickel-Eisen-Verhältnis die Leistung der Legierung maßgeblich beeinflusst: Ein höherer Nickelgehalt verbessert die Zähigkeit und Duktilität; ein höherer Eisengehalt erhöht zwar die Härte, verringert aber die Korrosionsbeständigkeit. Daher muss die Formel in der Produktion anwendungsspezifisch optimiert werden.

Die Mikrostruktur der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung besteht aus Wolframpartikeln und einer Nickel-Eisen-Matrix. Wolframpartikel sind üblicherweise nahezu kugelförmig oder polygonal und in die Nickel-Eisen-Matrix eingebettet, wodurch eine gleichmäßige Verbundstruktur entsteht. Diese Struktur verleiht der Legierung hervorragende mechanische Eigenschaften wie hohe Zugfestigkeit (üblicherweise 800–1000 MPa) und entsprechende Duktilität. Darüber hinaus profitiert die Legierung durch den Nickelanteil auch von ihrer Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit, was ihren langjährigen Einsatz in rauen Umgebungen ermöglicht. Kurz gesagt: Die Zusammensetzung der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist der Schlüssel zu ihrer überlegenen Leistung, die ihre breite Anwendung in Hochleistungsbereichen unmittelbar bestimmt.

### 1.2.1 Eigenschaften und Funktionen von Wolfram

Wolfram (Elementsymbol W) ist der wichtigste Bestandteil von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Seine einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften bestimmen die Kernleistung der Legierung. Wolfram ist ein seltenes Metall mit einer extrem hohen Dichte (19,25 g/cm<sup>3</sup>), die nahe an der Dichte von Gold (19,32 g/cm<sup>3</sup>) liegt, und zählt zu den dichtesten Metallen in der Natur. Diese hohe Dichte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

macht Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen zu einem idealen Werkstoff für Anwendungen, bei denen hohes Gewicht auf kleinem Raum konzentriert werden muss, wie beispielsweise Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt oder militärische panzerbrechende Kerne.

Wolfram hat mit 3410 °C einen extrem hohen Schmelzpunkt – den höchsten aller Metalle. Dadurch ist die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung sehr hitzebeständig und behält auch in Hochtemperaturumgebungen ihre strukturelle Stabilität. In der Luft- und Raumfahrt werden Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen beispielsweise häufig zur Herstellung von Gegengewichtskomponenten für Turbinenschaufeln verwendet, die extremen Bedingungen wie hohen Temperaturen und hohen Drehzahlen standhalten. Darüber hinaus weist Wolfram eine extrem hohe Härte (Mohshärte ca. 7,5) auf, die nur von Diamant übertroffen wird. Dadurch ist die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung sehr verschleißfest und eignet sich für die Herstellung verschleißfester Teile oder hochfester Werkzeuge.

Die chemische Stabilität von Wolfram ist ebenfalls ein wichtiger Aspekt seiner Rolle in Legierungen. Wolfram weist eine gute Korrosionsbeständigkeit gegenüber den meisten Säuren und Laugen auf und bleibt auch in aggressiven chemischen Umgebungen stabil. Dadurch eignen sich Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen gut für Strahlenschutzanwendungen in der Nuklearindustrie und im medizinischen Bereich, beispielsweise zur Herstellung von Gammastrahlenschutzschilden. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient von Wolfram (ca.  $4,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) erhöht die Dimensionsstabilität der Legierung zusätzlich und ermöglicht so die Beibehaltung präziser Geometrien auch in Umgebungen mit großen Temperaturschwankungen.

In Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen ist Wolfram in Form feiner Partikel gleichmäßig in der Nickel-Eisen-Matrix verteilt und bildet so eine hochdichte Verbundstruktur. Die hohe Härte und Dichte der Wolframpartikel bestimmen die wichtigsten mechanischen Eigenschaften und Gewichtseigenschaften der Legierung. Die Nickel-Eisen-Matrix verbindet die Wolframpartikel durch Flüssigphasensinterung fest miteinander und gleicht so die Nachteile von reinem Wolframmaterial – Sprödigkeit und schwierige Verarbeitung – aus. Dieser Synergieeffekt verleiht der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ausreichende Zähigkeit und Bearbeitbarkeit bei gleichbleibend hoher Dichte.

Die Rolle von Wolfram in der Legierung spiegelt sich auch in seiner Strahlenschutzwirkung wider. Dank seiner hohen Ordnungszahl ( $Z = 74$ ) kann Wolfram hochenergetische Strahlung wie Röntgen- und Gammastrahlen effektiv absorbieren. Daher sind Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen für medizinische Geräte (z. B. CT-Abschirmungen) und die Nuklearindustrie (z. B. Behälter für radioaktive Abfälle) von großer Bedeutung. Darüber hinaus bieten die hohe Wärmeleitfähigkeit (ca.  $173 \text{ W} / \text{m}\cdot\text{K}$ ) und die elektrische Leitfähigkeit von Wolfram zusätzliche Vorteile für bestimmte Spezialanwendungen, beispielsweise als Elektrodenmaterial oder Kühlkörper.

### 1.2.2 Eigenschaften und Funktionen von Nickel

Nickel (Elementsymbol Ni) ist ein wichtiges Bindephasenelement in Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Es macht üblicherweise 5–10 % der Gesamtmasse der Legierung aus und spielt eine

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schlüsselrolle bei der Optimierung der Legierungseigenschaften. Nickel ist ein silberweißes Übergangsmetall mit guter Duktilität, Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Seine Dichte beträgt  $8,91 \text{ g/cm}^3$  und sein Schmelzpunkt liegt bei  $1455 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die Zugabe von Nickel verbessert die Bearbeitungs- und mechanischen Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung deutlich und verleiht ihr ausreichende Zähigkeit und Schlagfestigkeit bei gleichbleibend hoher Dichte. Dadurch werden die Nachteile von reinem Wolfram, das spröde und schwer zu verarbeiten ist, ausgeglichen.

Im pulvermetallurgischen Herstellungsprozess von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen spielt Nickel seine Hauptrolle im Flüssigphasensintern. Da der Schmelzpunkt von Nickel deutlich niedriger ist als der von Wolfram ( $3410 \text{ }^\circ\text{C}$ ), schmilzt Nickel beim Hochtemperaturesintern zunächst zu einer flüssigen Phase, füllt die Lücken zwischen den Wolframpartikeln und fördert durch Kapillarwirkung die Neuordnung und Bindung der Wolframpartikel. Dieser Flüssigphasensintermechanismus erhöht die Dichte der Legierung deutlich (normalerweise nahe 99 % der theoretischen Dichte) und steigert so deren Festigkeit und Zähigkeit. Die Nickelmatrix umhüllt die hochharten Wolframpartikel fest und bildet eine gleichmäßige Verbundstruktur, die der Legierung auch unter hoher Belastung ihre strukturelle Integrität bewahrt.

Die chemische Stabilität von Nickel ist ein weiteres wichtiges Merkmal der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung. Nickel weist eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit gegenüber den meisten Säuren, Basen und oxidierenden Umgebungen auf und widersteht effektiv der Erosion durch Feuchtigkeit, Salznebel und andere korrosive Medien. Dies ermöglicht eine erweiterte Anwendung der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung in rauen Umgebungen, beispielsweise im Schiffsbau oder in der chemischen Industrie als korrosionsbeständige Gegengewichte. Darüber hinaus schützt die antioxidative Eigenschaft von Nickel die Legierung auch in Hochtemperaturumgebungen und verlängert so die Lebensdauer des Materials.

Aus mechanischer Sicht verbessern die Duktilität und Zähigkeit von Nickel die Schlag- und Bruchfestigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen deutlich. Reine Wolframwerkstoffe neigen aufgrund ihrer hohen Härte und Sprödigkeit bei Stößen oder zyklischer Beanspruchung zum Bruch. Nickel verleiht der Legierung eine gewisse plastische Verformbarkeit. Beispielsweise erreicht die Zugfestigkeit der Legierung 90W-7Ni-3Fe  $800\text{--}1000 \text{ MPa}$  und weist eine Dehnung von etwa  $10\text{--}20 \%$  auf. Dadurch eignet sie sich gut für Anwendungen mit hoher Beanspruchung, wie z. B. Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt oder militärische Panzerkerne.

Nickel beeinflusst auch die magnetischen Eigenschaften der Legierung. Nickel ist ein ferromagnetisches Material. Durch die Zugabe von Nickel weist die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung einen schwachen Magnetismus auf, was in bestimmten Anwendungen (z. B. bei magnetischer Abschirmung oder magnetischer Positionierung) Vorteile bietet. Der Nickelgehalt muss jedoch präzise kontrolliert werden, da ein zu hoher Nickelanteil die Legierungsdichte verringern und so die hohe Dichte beeinträchtigen kann. Zudem sind die Kosten für Nickel relativ hoch, sodass in der Produktion ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Leistung und Wirtschaftlichkeit erzielt werden muss. Kurz gesagt: Die Rolle von Nickel in Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen liegt hauptsächlich in der Verbesserung mechanischer

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Eigenschaften, der Förderung des Sinterprozesses, der Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit und der Bereitstellung bestimmter magnetischer Eigenschaften. Die synergistische Wirkung von Nickel, Wolfram und Eisen ermöglicht der Legierung ein ideales Gleichgewicht zwischen hoher Dichte, hoher Festigkeit und Bearbeitbarkeit und macht sie zu einem unverzichtbaren Werkstoff in der Luft- und Raumfahrt, im Militär und in der Medizin.

### 1.2.3 Eigenschaften und Funktionen von Eisen

Eisen (Elementsymbol Fe) ist ein weiteres wichtiges Bindephasenelement in Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen und macht üblicherweise 2–5 % der Legierungsmasse aus. Mit einer Dichte von  $7,87 \text{ g/cm}^3$  und einem Schmelzpunkt von  $1538 \text{ }^\circ\text{C}$  tragen die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Eisen wesentlich zur Leistung der Legierung bei. Die Zugabe von Eisen senkt nicht nur die Produktionskosten, sondern spielt auch eine wichtige Rolle bei der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Legierung, der Optimierung der Mikrostruktur und der Anpassung der magnetischen Eigenschaften, wodurch Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen vielfältige Anwendungsanforderungen erfüllen können. Beim Herstellungsprozess von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen wirken Eisen und Nickel gemeinsam als Bindephasen und sind am Flüssigphasensinterprozess beteiligt. Da der Schmelzpunkt von Eisen niedriger ist als der von Wolfram, verschmelzen Eisen und Nickel beim Sintern und bilden eine Flüssigphasenmatrix, die die Bindung und Neuordnung der Wolframpartikel fördert. Die Anwesenheit von Eisen kann die Mikrostruktur der Legierung verfeinern und die Wolframpartikel gleichmäßiger verteilen, wodurch die Gesamtfestigkeit und Zähigkeit der Legierung verbessert wird. Beispielsweise führt die Zugabe von Eisen in der Legierung 90W-7Ni-3Fe zu einer kompakteren Mikrostruktur der Legierung, wodurch Zugfestigkeit und Härte deutlich verbessert werden. Dies eignet sich für die Herstellung von Hochleistungsgegengewichten oder panzerbrechenden Kernen.

Die mechanischen Eigenschaften von Eisen dürfen bei der Verstärkung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen nicht außer Acht gelassen werden. Eisen weist eine hohe Härte und Festigkeit auf (Mohshärte ca. 4–5). Seine Zugabe erhöht die Gesamthärte der Legierung und macht sie dadurch besonders widerstandsfähig für Anwendungen, die Verschleißfestigkeit oder Schlagfestigkeit erfordern. Im Vergleich zu Nickel weist Eisen eine geringere Duktilität auf, die höhere Härte gleicht diesen Nachteil jedoch aus und ermöglicht es der Legierung, höheren mechanischen Belastungen in hochbelasteten Umgebungen standzuhalten. Im militärischen Bereich werden Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen beispielsweise aufgrund ihrer hohen Härte und Dichte als panzerbrechende Kerne eingesetzt, die gepanzerte Ziele effektiv durchdringen können.

Die Wirtschaftlichkeit von Eisen ist ein wichtiger Faktor für dessen Verwendung in Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Im Vergleich zu Nickel ist Eisen deutlich günstiger, und die teilweise Substitution von Nickel kann die Produktionskosten der Legierung effektiv senken, ohne die Leistung signifikant zu beeinträchtigen. Dies macht Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen im zivilen Bereich, beispielsweise für Gewichte für Sportgeräte oder Industriewerkzeuge, wettbewerbsfähiger. Eisen weist jedoch eine geringe Korrosionsbeständigkeit auf und oxidiert leicht in feuchter oder saurer Umgebung. Daher ist die Korrosionsbeständigkeit von Nickel entscheidend, um diesen Nachteil auszugleichen. In der Produktion

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

muss das Verhältnis von Nickel zu Eisen präzise optimiert werden, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Korrosionsbeständigkeit und Kosten zu gewährleisten.

Der Ferromagnetismus des Eisens verleiht der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ebenfalls bestimmte magnetische Eigenschaften. Ähnlich wie Nickel macht die Zugabe von Eisen die Legierung schwach magnetisch, was für bestimmte Anwendungen, die eine magnetische Reaktion erfordern, von Vorteil ist, beispielsweise in elektromagnetischen Geräten oder magnetischen Positionierungssystemen. Darüber hinaus kann die Zugabe von Eisen den Wärmeausdehnungskoeffizienten und die Wärmeleitfähigkeit der Legierung optimieren, sodass sie auch bei hohen Temperaturen oder thermischen Zyklen eine stabile Leistung behält. Es ist zu beachten, dass ein erhöhter Eisengehalt die Eigenschaften der Legierung negativ beeinflussen kann. Beispielsweise kann ein zu hoher Eisenanteil die Korrosionsbeständigkeit der Legierung verringern oder beim Hochtemperaturesintern unnötige Phasenänderungen hervorrufen, die die Stabilität der Mikrostruktur beeinträchtigen. Daher wird bei der Entwicklung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen der Eisengehalt üblicherweise auf einen niedrigeren Wert (z. B. 2–5 %) eingestellt, um ein ausgewogenes Leistungsverhältnis zu gewährleisten.

### 1.3 Historischer Hintergrund und Entwicklung der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

Als hochdichtes Legierungsmaterial sind der historische Hintergrund und die Entwicklung der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung eng mit dem Fortschritt der modernen Industrietechnologie verbunden. Seit die einzigartigen Eigenschaften von Wolfram im späten 19. Jahrhundert erkannt wurden, rückten Wolframlegierungen zunehmend in den Fokus der Forschung im Bereich der Hochleistungswerkstoffe. Durch die Kombination der hohen Dichte von Wolfram mit den Bindungseigenschaften von Nickel und Eisen überwindet die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung die Verarbeitungsschwierigkeiten reiner Wolframwerkstoffe und nimmt zunehmend eine wichtige Position in den Bereichen Luft- und Raumfahrt, Militär, Medizin und Industrie ein. Ihr Entwicklungsprozess spiegelt nicht nur den Fortschritt der Materialwissenschaft wider, sondern auch den wachsenden Bedarf der Menschheit an Hochleistungswerkstoffen.

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen profitierten von der Weiterentwicklung der Pulvermetallurgie, insbesondere vom Durchbruch des Flüssigphasensinterns, der Mitte des 20. Jahrhunderts eine Massenproduktion ermöglichte. Mit der Beschleunigung der globalen Industrialisierung, insbesondere der Nachfrage nach Hochleistungswerkstoffen während des Zweiten Weltkriegs, wurden Entwicklung und Anwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen rasant vorangetrieben. Vom anfänglichen militärischen Bereich bis hin zum späteren zivilen und medizinischen Bereich wurde das Anwendungsspektrum von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen kontinuierlich erweitert und ihre Leistungsfähigkeit kontinuierlich optimiert. Im Folgenden werden die Entdeckung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen, ihre frühen Anwendungen und technologischen Fortschritte detailliert erläutert.

#### 1.3.1 Entdeckung der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

Die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist eng mit der Erforschung der Eigenschaften von Wolfram und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Entwicklung der Pulvermetallurgie verbunden. Als seltenes Metall mit hoher Dichte und hohem Schmelzpunkt erregte Wolfram bereits Ende des 18. Jahrhunderts die Aufmerksamkeit der Wissenschaftler. 1783 isolierten die spanischen Chemiker, die Brüder Eluard, erstmals Wolfram aus Wolframsäure und bestätigten dessen hohe Dichte ( $19,25 \text{ g/cm}^3$ ) und hohen Schmelzpunkt ( $3410 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Aufgrund der Sprödigkeit und der schwierigen Verarbeitung von Wolfram beschränkte sich die frühe Anwendung von Wolfram jedoch hauptsächlich auf reines Wolfram oder einfache Wolframverbindungen, wie beispielsweise Wolframfäden für die Herstellung von Glühbirnen.

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen entstanden zu Beginn des 20. Jahrhunderts mit dem Aufkommen der Pulvermetallurgie. Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts begannen Materialwissenschaftler, die Verarbeitungseigenschaften von Wolfram durch die Zugabe niedrigschmelzender Metalle wie Nickel und Eisen zu verbessern. Nickel und Eisen wurden aufgrund ihrer guten Duktilität und ihres niedrigen Schmelzpunkts (Nickel  $1455 \text{ }^\circ\text{C}$ , Eisen  $1538 \text{ }^\circ\text{C}$ ) als Bindephasen ausgewählt. Beim Hochtemperaturesintern können sie eine flüssige Phase bilden und die hochschmelzenden Wolframpartikel zu einer dichten Legierungsstruktur umhüllen. Der Prototyp dieses Verfahrens tauchte erstmals in den 1920er Jahren auf, als Forscher versuchten, wolframbasierte Verbundwerkstoffe mittels Pulvermetallurgie für den Bedarf von Industrie und Militär herzustellen.

von Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen begann in den 1930er Jahren, hauptsächlich getrieben durch militärische Bedürfnisse. Am Vorabend des Zweiten Weltkriegs stieg in verschiedenen Ländern die Nachfrage nach leistungsstarken panzerbrechenden Materialien sprunghaft an, und Wolfram war aufgrund seiner hohen Dichte und Härte ideal für panzerbrechende Projektilkerne geeignet. Aufgrund seiner Sprödigkeit lässt sich reines Wolfram jedoch nur schwer zu komplexen Formen verarbeiten, was seine Anwendung einschränkt. Forscher haben herausgefunden, dass sich Zähigkeit und Bearbeitbarkeit von Wolfram-basierten Materialien durch die Zugabe von Nickel und Eisen deutlich verbessern lassen. In den späten 1930er Jahren entwickelten wissenschaftliche Forschungseinrichtungen in den USA und Deutschland fast gleichzeitig Legierungsformeln mit Wolfram als Hauptbestandteil und Nickel und Eisen als Bindephase, mit einem typischen Verhältnis von 90W-7Ni-3Fe. Das Aufkommen dieser Formel markiert die offizielle Geburtsstunde der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung.

Die Entdeckung der Nickel-Eisen-Legierung profitierte auch vom umfassenden Verständnis des Flüssigphasensintermechanismus. Während des Sinterprozesses kann die flüssige Phase aus Nickel und Eisen die Lücken zwischen den Wolframpartikeln wirksam füllen, die Porosität verringern und die Dichte sowie die mechanischen Eigenschaften der Legierung verbessern. Dieser technologische Durchbruch legte den Grundstein für die industrielle Produktion von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. In den 1940er Jahren wurden mit der Verbesserung der Anlagen und Prozesse der Pulvermetallurgie die Produktionseffizienz und -qualität von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen weiter verbessert, und ihre Anwendungsgebiete erweiterten sich von der Rüstungsindustrie auf den zivilen und medizinischen Bereich. Kurz gesagt: Die Entdeckung der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist das umfassende Ergebnis der Erforschung der Wolframeigenschaften und der Entwicklung der Pulvermetallurgietechnologie, die einen neuen Weg für die Anwendung moderner Hochleistungswerkstoffe eröffnet hat.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 1.3.2 Frühe Anwendungen und technologische Fortschritte

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen wurden vor allem im Zweiten Weltkrieg (1939–1945) in der Rüstungsindustrie eingesetzt. Aufgrund ihrer hohen Dichte und Härte werden Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen häufig zur Herstellung panzerbrechender Munitionskerne verwendet, um den Schutzanforderungen von Panzern und gepanzerten Fahrzeugen gerecht zu werden. Im Vergleich zu herkömmlichen Stahlkernen bieten Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungskerne bei geringerem Volumen mehr kinetische Energie und durchdringen schwere Panzerungen effektiv. Diese Anwendung hat die Forschung, Entwicklung und Produktion von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen stark vorangetrieben und Länder dazu veranlasst, hohe Investitionen in die Optimierung ihrer Rezepturen und Herstellungsprozesse zu tätigen.

Technologisch basierte die Herstellung früher Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen hauptsächlich auf pulvermetallurgischen Verfahren, die drei Hauptschritte umfassten: Mischen, Pressen und Sintern. Mit der Sintertechnologie der 1940er Jahre konnte zwar eine höhere Dichte erreicht werden, es gab jedoch weiterhin einige Probleme, wie die ungleichmäßige Verteilung der Wolframpartikel und eine schwer kontrollierbare Sinterschrumpfung. Um diese Probleme zu lösen, entwickelten Forscher modernere Geräte wie Vakuumsinteröfen und das heißisostatische Pressen (HIP). Diese Technologien ermöglichen das Sintern bei höheren Temperaturen und Drücken, wodurch die Dichte und die mechanischen Eigenschaften der Legierung weiter verbessert werden. Beispielsweise reduziert die heißisostatische Presstechnologie durch Sintern unter isotropem Druck die Porosität im Inneren der Legierung erheblich, sodass ihre Zugfestigkeit 800–1000 MPa und ihre Dehnung 10–20 % erreicht.

Das typische Verhältnis früher Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen betrug 90W-7Ni-3Fe. Mit zunehmenden Anwendungsanforderungen begannen Forscher jedoch, das Nickel-Eisen-Verhältnis anzupassen, um bestimmte Eigenschaften zu optimieren. So kann beispielsweise ein erhöhter Nickelgehalt die Zähigkeit der Legierung verbessern und sie für schlagfeste Teile geeignet machen. Ein erhöhter Eisengehalt senkt die Kosten und ermöglicht die Massenproduktion im zivilen Bereich. Darüber hinaus wird die Zugabe von Spurenelementen (wie Kupfer oder Kobalt) erforscht, um die Korrosionsbeständigkeit oder die magnetischen Eigenschaften der Legierung weiter zu verbessern.

In den 1950er Jahren, mit der rasanten Entwicklung der Luft- und Raumfahrtindustrie, weitete sich die Anwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen auf den Bereich der Gegengewichtskomponenten aus. Aufgrund ihrer hohen Dichte ( $16,5\text{--}18,75\text{ g/cm}^3$ ) werden Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen zur Herstellung von Ausgleichsgewichten für Flugzeuge und Hubschrauber verwendet, beispielsweise für Querruder und Rotorausgleichsvorrichtungen. Diese Komponenten müssen auf begrenztem Raum ausreichend Gewicht bieten und gleichzeitig gute mechanische Eigenschaften und gute Umweltverträglichkeit des Materials aufweisen. Die Korrosionsbeständigkeit und Dimensionsstabilität von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen machen sie zur idealen Wahl.

Im medizinischen Bereich erregten die strahlenabschirmenden Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in den 1960er Jahren zunehmend Aufmerksamkeit. Aufgrund seiner hohen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ordnungszahl ( $Z = 74$ ) absorbiert Wolfram effektiv Röntgen- und Gammastrahlen und wird daher zur Herstellung von Schutzhüllen für medizinische Geräte und Strahlenschutzbehältern für die Nuklearindustrie verwendet. Im Vergleich zu herkömmlichen Bleiabschirmmaterialien weisen Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen eine höhere Dichte und bessere mechanische Festigkeit auf, erzielen die gleiche Abschirmwirkung bei geringerer Dicke und sind umweltfreundlicher.

Der technologische Fortschritt spiegelt sich auch in der Verbesserung der Legierungsverarbeitungstechnologie wider. Die anfängliche mechanische Bearbeitung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen war schwierig, insbesondere bei der Herstellung komplexer Formen. In den 1970er Jahren verbesserte die Einführung der CNC- und EDM-Technologie die Bearbeitungsgenauigkeit und -effizienz der Legierung deutlich. Dadurch konnten komplexere geometrische Formen hergestellt werden, um den hohen Präzisionsanforderungen der Luft- und Raumfahrt sowie der Medizin gerecht zu werden.

Kurz gesagt: Die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung wurde zunächst hauptsächlich in der Rüstungsindustrie eingesetzt und später auch in der Luft- und Raumfahrt sowie der Medizintechnik eingesetzt. Ihre Entwicklung profitierte vom kontinuierlichen Fortschritt in der Pulvermetallurgie, der Sintertechnologie und der Verarbeitungstechnik. Diese technologischen Durchbrüche verbesserten nicht nur die Leistung und Produktionseffizienz der Legierung, sondern förderten auch ihre breite Anwendung in vielen Bereichen und legten damit einen wichtigen Grundstein für die Entwicklung moderner Hochleistungswerkstoffe.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung Bild

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Kapitel 2 Physikalische und chemische Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

### 2.1 Dichte und mechanische Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen spielen aufgrund ihrer hervorragenden physikalischen und mechanischen Eigenschaften in vielen Hochleistungsanwendungen eine wichtige Rolle. Ihre hohe Dichte, ausgezeichnete Zugfestigkeit und entsprechende Zähigkeit machen sie zu idealen Werkstoffen für die Luft- und Raumfahrt, das Militär, die Medizin und die Industrie. Die Dichte von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen liegt üblicherweise zwischen 16,5 und 18,75 g/cm<sup>3</sup> und liegt damit nahe an der Dichte von Edelmetallen wie Gold oder Platin. Ihre mechanischen Eigenschaften werden durch das Zusammenspiel der hohen Härte von Wolfram und der Nickel- und Eisen-Bindepheasen optimiert. Im Folgenden werden die Eigenschaften der hohen Dichte sowie der Zugfestigkeit und Zähigkeit detailliert erläutert.

#### 2.1.1 Eigenschaften hoher Dichte

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen zeichnen sich durch eine besonders hohe physikalische Eigenschaft aus, die hauptsächlich auf die hohe Dichte von Wolfram (19,25 g/cm<sup>3</sup>) zurückzuführen ist. Wolfram, der Hauptbestandteil der Legierung, enthält üblicherweise 85–95 %, wodurch die Gesamtdichte der Legierung deutlich höher ist als die von herkömmlichen Metallen wie Stahl (7,85 g/cm<sup>3</sup>) oder Aluminium (2,7 g/cm<sup>3</sup>). Durch die Anpassung des Nickel-Eisen-Verhältnisses lässt sich die Dichte der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung präzise im Bereich von 16,5–18,75 g/cm<sup>3</sup> steuern, um den Anforderungen verschiedener Anwendungen gerecht zu werden. Beispielsweise beträgt die Dichte der Legierung 90W-7Ni-3Fe etwa 17,0 g/cm<sup>3</sup>, während die Dichte der Legierung 95W-4Ni-1Fe mit höherem Wolframgehalt bei etwa 18,5 g/cm<sup>3</sup> liegen kann.

Dank ihrer hohen Dichte eignet sich Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung besonders gut für Anwendungen, die konzentriertes Gewicht auf kleinem Raum erfordern. In der Luft- und Raumfahrt wird Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung häufig zur Herstellung von Gegengewichtskomponenten für Flugzeuge und Hubschrauber verwendet, beispielsweise für Querruder- oder Rotorausgleichsgewichte. Diese Komponenten benötigen ausreichend Masse auf begrenztem Raum, um die Stabilität und Balance des Flugzeugs zu gewährleisten. Im Vergleich zu herkömmlichen Materialien wie Blei weist Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung nicht nur eine höhere Dichte auf, sondern auch eine bessere mechanische Festigkeit und Umweltstabilität. Dadurch werden die Toxizitäts- und Weichheitsmängel von Blei vermieden.

In der Rüstungsindustrie verleiht die hohe Dichte der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung eine hervorragende Durchdringungsfähigkeit mit kinetischer Energie. Beispielsweise nutzt der panzerbrechende Kern die hohe Dichte der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung, um bei einem Aufprall mit hoher Geschwindigkeit die Energie auf eine kleine Fläche zu konzentrieren und so gepanzerte Ziele effektiv zu durchdringen. Darüber hinaus findet die hohe Dichte auch wichtige Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Strahlenabschirmung. Die hohe Ordnungszahl von Wolfram (Z=74) ermöglicht die effektive Absorption energiereicher Strahlung wie Röntgen- und Gammastrahlen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Daher wird die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung häufig als Abschirmmaterial in medizinischen Geräten (z. B. Schutzabdeckungen für CT-Geräte) und der Nuklearindustrie (z. B. Behälter für radioaktive Abfälle) verwendet. Im Vergleich zu Blei kann die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung bei geringerer Dicke dieselbe Abschirmwirkung erzielen, wodurch die Größe der Geräte reduziert wird.

Die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist eng mit ihrer Mikrostruktur verbunden. Im pulvermetallurgischen Herstellungsprozess ermöglicht die Flüssigphasensinterung die Bildung einer Matrix aus Nickel und Eisen, die die Wolframpartikel eng umschließt und die Porosität reduziert, sodass die Dichte der Legierung nahe am theoretischen Wert (über 99 %) liegt. Diese hohe Dichte gewährleistet die Dimensionsstabilität der Legierung auch bei hoher Belastung oder hohen Temperaturen und verhindert Leistungseinbußen durch Porosität. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung (ca.  $4,5-5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) erhöht zudem ihre Stabilität in temperaturwechselnden Umgebungen und verschafft ihr einen Vorteil in Präzisionsinstrumenten und Hochtemperaturanwendungen.

### 2.1.2 Zugfestigkeit und Zähigkeit

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen sind der Kern ihrer mechanischen Eigenschaften und bestimmen ihre Zuverlässigkeit und ihren Anwendungsbereich in hochbelasteten Umgebungen. Die hohe Härte und Festigkeit von Wolfram bilden die Grundlage der Legierung, während Nickel und Eisen als Bindephasen die Zähigkeit und Bruchfestigkeit der Legierung deutlich verbessern. Die Zugfestigkeit einer typischen Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung (z. B. 90W-7Ni-3Fe) liegt zwischen 800 und 1000 MPa, die Dehnung beträgt etwa 10–20 %, was ihr eine gewisse plastische Verformbarkeit bei gleichbleibend hoher Festigkeit ermöglicht.

Zugfestigkeit beschreibt die Fähigkeit einer WNiFe- Legierung, Zugspannungen standzuhalten, ohne zu brechen. Im pulvermetallurgischen Prozess bilden Nickel und Eisen durch Flüssigphasensintern eine gleichmäßige Matrix, die die hochharten Wolframpartikel fest bindet. Diese Verbundstruktur ermöglicht es der Legierung, ihre strukturelle Integrität auch in hochbelasteten Umgebungen zu bewahren. In der Luft- und Raumfahrt wird WNiFe- Legierung beispielsweise zur Herstellung von Gegengewichtskomponenten für Turbinenschaufeln verwendet, die durch Hochgeschwindigkeitsrotation und Vibrationen enormen Zugspannungen ausgesetzt sind. Die hohe Zugfestigkeit der Legierung stellt sicher, dass sie auch unter extremen Bedingungen nicht versagt.

Zähigkeit ist ein weiteres wichtiges Merkmal von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen und gleicht die Sprödigkeit von reinem Wolfram aus. Reines Wolfram neigt aufgrund seiner hohen Härte und seiner Kristallstruktur zu Sprödbrüchen bei Stößen oder zyklischer Belastung. Die Duktilität von Nickel und die Festigkeit von Eisen wirken synergistisch in der Legierung. Dadurch absorbiert die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung Energie bei Stößen oder Ermüdung und verhindert so einen plötzlichen Bruch. Beispielsweise muss die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung bei der Herstellung von panzerbrechenden Kernen im Militär ihre strukturelle Integrität auch bei Hochgeschwindigkeitsstößen bewahren. Ihre moderate Zähigkeit ermöglicht es ihr, der Rissausbreitung durch Stöße zu widerstehen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Das Verhältnis von Nickel zu Eisen beeinflusst maßgeblich die Zugfestigkeit und Zähigkeit der Legierung. Ein höherer Nickelgehalt (z. B. 7–10 %) kann die Duktilität und Zähigkeit der Legierung verbessern und sie somit für Anwendungen mit hohen Anforderungen an Schlagfestigkeit geeignet machen. Ein erhöhter Eisengehalt (z. B. 3–5 %) kann zwar Härte und Festigkeit erhöhen, die Zähigkeit jedoch leicht verringern. Daher muss die Formel in der Produktion anwendungsspezifisch optimiert werden. Beispielsweise bietet die Legierung 90W-7Ni-3Fe ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Festigkeit und Zähigkeit und wird häufig in Gegengewichten und militärischen Komponenten eingesetzt. Legierungen mit höherem Wolframgehalt (z. B. 95W-4Ni-1Fe) hingegen legen den Schwerpunkt eher auf Festigkeit und eignen sich für Anwendungen mit extrem hohen Härteanforderungen.

Die Mikrostruktur der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung hat ebenfalls einen wichtigen Einfluss auf ihre mechanischen Eigenschaften. Größe und gleichmäßige Verteilung der Wolframpartikel bestimmen direkt die Festigkeit und Zähigkeit der Legierung. Kleinere Wolframpartikel (üblicherweise im Bereich von 10–50 Mikrometern) und eine gleichmäßige Matrixverteilung können die Spannungskonzentration reduzieren und die Zugfestigkeit sowie Bruchfestigkeit verbessern. Darüber hinaus können Wärmebehandlungs- und Verarbeitungsverfahren (wie z. B. heißisostatisches Pressen) die Mikrostruktur der Legierung weiter optimieren, innere Defekte beseitigen und so ihre mechanischen Eigenschaften verbessern.

### 2.1.3 Härte und Verschleißfestigkeit

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen sind wichtige Bestandteile ihrer mechanischen Eigenschaften und ermöglichen eine gute Leistung in Umgebungen mit hoher Beanspruchung und hohem Verschleiß. Die Härte spiegelt die Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber Verformungen und Kratzern wider, während die Verschleißfestigkeit die Lebensdauer des Materials unter Reibungs- oder Abriebbedingungen bestimmt. Die hohe Härte und die ausgezeichnete Verschleißfestigkeit der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung beruhen hauptsächlich auf der hohen Härte des Wolframs (Mohshärte ca. 7,5) und dem synergistischen Effekt der Nickel- und Eisenbindungsphasen. Daher findet sie breite Anwendung in Anwendungen, die Verschleißfestigkeit erfordern, wie z. B. bei militärischen Panzerkernen, Industriewerkzeugen und Luft- und Raumfahrtkomponenten.

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen weisen je nach Wolframgehalt und Mikrostruktur üblicherweise eine Vickershärte (HV) von 250–400 auf. Beispielsweise beträgt die Härte der Legierung 90W-7Ni-3Fe etwa 300 HV, während die Härte der Legierung 95W-4Ni-1Fe mit höherem Wolframgehalt 350–400 HV erreichen kann. Die hohe Härte des Wolframs bildet die Basis der Legierung. Die aus Nickel und Eisen gebildete Matrix verbindet die Wolframpartikel durch Flüssigphasensintern eng miteinander, wodurch Mikrodefekte reduziert und die Gesamthärte weiter erhöht wird. Diese hohe Härte macht die Legierung widerstandsfähiger gegen plastische Verformungen durch äußere Kräfte und eignet sich besonders für die Herstellung von Teilen, die eine hohe Festigkeit und Verformungsbeständigkeit erfordern, wie z. B. panzerbrechende Kerne oder hochpräzise Gegengewichte.

Die Verschleißfestigkeit ist eine weitere wichtige Eigenschaft der WNiFe- Legierung, die auf ihre hohe

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Härte und dichte Mikrostruktur zurückzuführen ist. In reibungs- oder abrasiven Umgebungen kann die hohe Härte der Wolframpartikel dem Oberflächenverschleiß effektiv widerstehen, während die Zähigkeit der Nickel-Eisen-Matrix verschleißbedingte Risse oder Abplatzungen des Materials verhindert. Im industriellen Bereich wird die WNiFe- Legierung beispielsweise häufig zur Herstellung verschleißfester Teile von Formen oder Schneidwerkzeugen verwendet, die unter hohen Belastungen und wiederholten Reibungsbedingungen eine lange Lebensdauer aufweisen. Der niedrige Reibungskoeffizient der Legierung (dank der Oberflächeneigenschaften von Nickel) verbessert zudem ihre Verschleißfestigkeit und reduziert den Verschleiß an Kontaktflächen.

Die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist eng mit ihrem Herstellungsprozess verbunden. Flüssigphasensintern und Heißisostatisches Pressen (HIP) in der Pulvermetallurgie können die Dichte der Legierung deutlich verbessern, innere Poren und Mikrorisse reduzieren und so die Verschleißfestigkeit erhöhen. Größe und Verteilung der Wolframpartikel haben ebenfalls einen wichtigen Einfluss auf die Verschleißfestigkeit. Kleinere Wolframpartikel (10–50 Mikrometer) können eine gleichmäßigere Struktur bilden, die Spannungskonzentration reduzieren und so die Verschleißfestigkeit verbessern. In einigen Anwendungen kann eine Oberflächenbehandlung (wie Aufkohlen oder Beschichten) die Verschleißfestigkeit der Legierung weiter verbessern und sie so an anspruchsvollere Arbeitsumgebungen anpassen.

Das Gleichgewicht zwischen Härte und Verschleißfestigkeit ist ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Eine zu hohe Härte kann zu einer Verringerung der Zähigkeit führen und die Legierung anfällig für Sprödbrüche unter Schlägeinwirkung machen. Daher muss das Verhältnis von Nickel und Eisen präzise kontrolliert werden, um das optimale Verhältnis zwischen Härte und Zähigkeit zu erreichen. Beispielsweise kann ein erhöhter Nickelgehalt die Zähigkeit verbessern, was für verschleißfeste Teile, die Schlägeinwirkungen standhalten müssen, von Vorteil ist; ein erhöhter Eisengehalt hingegen kann die Härte erhöhen, was für Anwendungen mit hohem Verschleiß von Vorteil ist. Kurz gesagt: Die hohe Härte und Verschleißfestigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen bieten unersetzliche Vorteile in einer Vielzahl von Hochleistungsanwendungen.

## 2.2 Thermische Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

Die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung zeichnet sich durch ihre wichtigen Eigenschaften in Umgebungen mit hohen Temperaturen und thermischen Zyklen aus, die sich direkt auf ihre Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, im Militär und in der Industrie auswirken. Zu den thermischen Eigenschaften zählen Schmelzpunkt, thermische Stabilität, Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnungskoeffizient. Der hohe Schmelzpunkt und die ausgezeichnete thermische Stabilität von Wolfram verleihen der Legierung Zuverlässigkeit unter extremen Temperaturbedingungen, während die Zugabe von Nickel und Eisen das Gleichgewicht zwischen den thermischen und mechanischen Eigenschaften der Legierung optimiert.

### 2.2.1 Schmelzpunkt und thermische Stabilität

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen werden hauptsächlich durch Wolfram beeinflusst, das den höchsten

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schmelzpunkt aller Metalle (3410 °C) aufweist und der Legierung daher eine ausgezeichnete Hochtemperaturbeständigkeit verleiht. Obwohl die Schmelzpunkte von Nickel (Schmelzpunkt 1455 °C) und Eisen (Schmelzpunkt 1538 °C) deutlich niedriger sind als die von Wolfram, bleiben Wolframpartikel beim pulvermetallurgischen Herstellungsprozess beim Sintern fest, während Nickel und Eisen durch Flüssigphasensintern die Matrix bilden. Daher hängen Schmelzpunkt und thermische Stabilität der Legierung insgesamt hauptsächlich von den Eigenschaften der Wolframpartikel ab. Die tatsächliche Einsatztemperatur von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen liegt üblicherweise deutlich unter dem Schmelzpunkt von Wolfram und liegt im Allgemeinen im Bereich von 1000–1500 °C, was für die meisten Hochtemperaturanwendungen ausreichend ist.

Die thermische Stabilität ist ein wichtiger Vorteil der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung. Sie beschreibt ihre Fähigkeit, Struktur und Leistung auch bei hohen Temperaturen zu erhalten. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient von Wolfram (ca.  $4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) verleiht der Legierung eine ausgezeichnete Dimensionsstabilität bei Temperaturschwankungen und reduziert Verformungen oder Risse durch thermische Spannungen. Dies ist besonders wichtig für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, wie z. B. Gegengewichte von Turbinenschaufeln oder Raumfahrzeugkomponenten, die auch bei hohen Temperaturen und Temperaturwechselbelastungen eine präzise Geometrie beibehalten müssen. Die Zugabe von Nickel erhöht die thermische Stabilität der Legierung zusätzlich. Ihre gute Oxidationsbeständigkeit ermöglicht es der Legierung, oxidativer Korrosion in Hochtemperaturumgebungen zu widerstehen und ihre Lebensdauer zu verlängern.

In der Rüstungsindustrie macht die thermische Stabilität der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung sie zu einem idealen Material für Umgebungen mit hohen Temperaturen. Trifft beispielsweise der Kern eines panzerbrechenden Projektils mit hoher Geschwindigkeit auf ein gepanzertes Ziel, entstehen augenblicklich hohe Temperaturen. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen halten solchen extremen Bedingungen stand, ohne zu erweichen oder zu versagen. Darüber hinaus werden Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in der Nuklearindustrie zur Herstellung von Strahlenschutzbehältern verwendet, und ihre thermische Stabilität gewährleistet Zuverlässigkeit in Umgebungen mit hohen Strahlungstemperaturen.

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen zeichnen sich auch durch ihre Mikrostruktur aus. Die durch Flüssigphasensintern entstehende dichte Struktur (Dichte nahe 99 %) reduziert innere Poren und Defekte, wodurch die Legierung bei hohen Temperaturen weniger anfällig für Phasenwechsel oder Korngrenzenverschiebungen ist. Durch das heißisostatische Pressen wird die Mikrostruktur der Legierung weiter optimiert und die Stabilität ihrer mechanischen Eigenschaften in Hochtemperaturumgebungen verbessert. Das Verhältnis von Nickel zu Eisen hat jedoch einen gewissen Einfluss auf die thermische Stabilität: Ein zu hoher Eisengehalt kann aufgrund der geringeren Oxidationsbeständigkeit die Korrosionsbeständigkeit der Legierung in Hochtemperaturumgebungen verringern, daher muss die Zusammensetzung genau kontrolliert werden.

### 2.2.2 Wärmeausdehnungskoeffizient

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen sind ein wichtiger Indikator für ihre Wärmeleistung und geben den

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Grad der Dimensionsänderung des Materials bei Temperaturänderungen an. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen liegt üblicherweise zwischen  $4,5$  und  $5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Dieser niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient ist hauptsächlich auf die Eigenschaften von Wolfram zurückzuführen (der Wärmeausdehnungskoeffizient von Wolfram beträgt etwa  $4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ). Nickel (ca.  $13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) und Eisen (ca.  $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) weisen höhere Wärmeausdehnungskoeffizienten auf. Da Wolfram jedoch die Legierung dominiert (normalerweise 85–95 %), bleibt der Gesamtwärmeausdehnungskoeffizient der Legierung niedrig und liegt nahe an den Eigenschaften von reinem Wolfram.

Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient verleiht der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung eine ausgezeichnete Dimensionsstabilität bei hohen Temperaturen oder thermischen Zyklen und widersteht effektiv thermischen Spannungen oder Verformungen durch Temperaturschwankungen. Diese Eigenschaft ist besonders wichtig in der Luft- und Raumfahrt, beispielsweise bei Gegengewichtskomponenten zur Herstellung von Flugzeugturbinenschaufeln oder den Ausgleichsblöcken von Raumfahrzeugen, die auch bei schneller Erwärmung oder Abkühlung ihre präzise Geometrie beibehalten müssen. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient stellt sicher, dass die Legierung bei Temperaturschwankungen keine nennenswerte Volumenausdehnung oder -kontraktion erfährt und so Strukturversagen oder Präzisionsverlust vermieden werden.

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen hängen auch von ihrem Zusammensetzungsverhältnis und ihrer Mikrostruktur ab. Beispielsweise beträgt der Wärmeausdehnungskoeffizient der Legierung 90W-7Ni-3Fe etwa  $5,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , während der Wärmeausdehnungskoeffizient der Legierung 95W-4Ni-1Fe mit höherem Wolframanteil bei etwa  $4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  liegen kann, was auf eine bessere Dimensionsstabilität hinweist. Das Verhältnis von Nickel und Eisen beeinflusst den Wärmeausdehnungskoeffizienten in gewissem Maße: Ein höherer Nickel- oder Eisenanteil erhöht den Wärmeausdehnungskoeffizienten leicht, daher müssen Dichte, Festigkeit und Wärmeausdehnungseigenschaften bei der Entwicklung der Legierung abgewogen werden. Darüber hinaus können Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen (HIP) im pulvermetallurgischen Verfahren die Dichte der Legierung erhöhen und Mikrodefekte reduzieren, wodurch ihre Stabilität in thermischen Zyklen weiter verbessert wird.

In der Praxis bietet der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung erhebliche Vorteile bei Präzisionsinstrumenten und Hochtemperaturumgebungen. Beispielsweise gewährleistet die Dimensionsstabilität der Legierung bei Strahlenschutzgeräten im medizinischen Bereich die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Abschirmung im Langzeiteinsatz. Auch in der Nuklearindustrie wird die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung zur Herstellung von Behältern für radioaktive Abfälle verwendet. Ihr niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient hält der thermischen Belastung in Hochtemperatur-Strahlungsumgebungen stand und verhindert Verformungen oder Risse im Behälter.

### 2.2.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen ist ein weiterer wichtiger Aspekt ihrer

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

thermischen Eigenschaften und bestimmt die Leistung des Materials bei der Wärmeleitung. Wolfram hat eine hohe Wärmeleitfähigkeit von etwa  $173 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$ , während Nickel (etwa  $90 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$ ) und Eisen (etwa  $80 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$ ) eine relativ niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Da Wolfram den größten Anteil der Legierung ausmacht (üblicherweise 85–95 %), liegt die Wärmeleitfähigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen je nach Zusammensetzung und Mikrostruktur im Allgemeinen zwischen 100 und  $130 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$ . Diese höhere Wärmeleitfähigkeit ermöglicht der Legierung eine schnelle Wärmeübertragung in Hochtemperaturumgebungen und reduziert so das Risiko einer lokalen Überhitzung.

Dank ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit eignet sich Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung besonders für Anwendungen, die eine effektive Wärmeableitung erfordern. In der Luft- und Raumfahrt wird die Legierung beispielsweise zur Herstellung von Hochtemperaturkomponenten (wie Gegengewichten von Turbinenschaufeln) eingesetzt. Ihre gute Wärmeleitfähigkeit leitet die im Betrieb entstehende Wärme schnell an die Umgebung ab und verhindert so einen Ausfall der Komponenten durch Überhitzung. In der Elektronikindustrie wird Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung gelegentlich als Kühlkörpermaterial eingesetzt. Ihre hohe Wärmeleitfähigkeit und Dichte tragen dazu bei, die thermische Belastung elektronischer Geräte zu bewältigen und deren Stabilität bei hohem Leistungsbedarf zu gewährleisten. Die Wärmeleitfähigkeit hängt eng mit der Mikrostruktur und dem Herstellungsprozess der Legierung zusammen. Die durch Flüssigphasensintern entstehende dichte Struktur (Dichte nahe 99 %) reduziert die innere Porosität und Korngrenzenstreuung und verbessert so die Wärmeleitfähigkeit. Das heißisostatische Pressen optimiert die Mikrostruktur der Legierung zusätzlich, reduziert den Wärmewiderstand und verbessert die Wärmeleitfähigkeit. Das Verhältnis von Nickel zu Eisen beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit jedoch leicht: Ein höherer Nickel- oder Eisengehalt kann aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit die Gesamtwärmeleitfähigkeit der Legierung leicht reduzieren. Deshalb werden bei Anwendungen, die eine hohe Wärmeleitfähigkeit erfordern, üblicherweise Formulierungen mit hohem Wolframgehalt wie 95W-4Ni-1Fe bevorzugt. Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen sind auch bei der Verarbeitung bei hohen Temperaturen und vor übergehenden Thermoschocks im Vorteil. Bei militärischen Anwendungen für panzerbrechende Kerne beispielsweise erzeugt die Legierung bei Aufprallen mit hoher Geschwindigkeit augenblicklich hohe Temperaturen, und ihre hohe Wärmeleitfähigkeit kann die Wärme rasch ableiten, um lokale Erweichungen oder Strukturschäden zu vermeiden. Außerdem verbessert die Kombination aus Wärmeleitfähigkeit und niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten die Leistung der Legierung in Umgebungen mit thermischen Zyklen weiter und ermöglicht es ihr, bei schnellen Erwärmungs- und Abkühlungsbedingungen stabil zu bleiben.

### 2.3 Chemische Stabilität der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen sind in verschiedenen Umgebungen ein wichtiges Merkmal und bestimmen ihre Lebensdauer unter korrosiven oder oxidierenden Bedingungen. Die chemische Stabilität der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung beruht hauptsächlich auf der hervorragenden Korrosionsbeständigkeit von Wolfram und Nickel. Obwohl die Zugabe von Eisen die Korrosionsbeständigkeit leicht verringert, weist die Legierung insgesamt durch präzise Steuerung des Verhältnisses dennoch eine gute chemische Stabilität auf. Diese Eigenschaft ermöglicht den Langzeiteinsatz in feuchten, sauren oder heißen Umgebungen und findet breite Anwendung im

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schiffsbau, der chemischen Industrie, der Medizin und der Nuklearindustrie.

Wolfram weist eine extrem hohe chemische Stabilität und eine gute Korrosionsbeständigkeit gegenüber den meisten Säuren, Laugen und Oxidationsmitteln auf. Beispielsweise ist Wolfram bei Raumtemperatur sehr korrosionsbeständig gegenüber Salzsäure, Schwefelsäure und Salpetersäure und reagiert nur geringfügig in konzentrierter Salpetersäure oder Flusssäure bei hohen Temperaturen. Diese Eigenschaft ermöglicht es Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen, ihre strukturelle Integrität in sauren Umgebungen zu bewahren und eignet sich zur Herstellung korrosionsbeständiger Teile in der chemischen Industrie, beispielsweise von Gegengewichten für Reaktionsbehälter oder Rohrleitungen.

Die Zugabe von Nickel erhöht die chemische Stabilität der Legierung zusätzlich. Nickel weist eine hohe Korrosionsbeständigkeit gegenüber Feuchtigkeit, Salznebel und alkalischer Umgebung auf, insbesondere in Meeresumgebungen. Die Nickelmatrix der Legierung kann eine dichte Oxidschicht (hauptsächlich NiO) auf der Oberfläche bilden, die weitere Korrosionsreaktionen wirksam verhindert. Diese Eigenschaft ermöglicht den Einsatz von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen als Gegengewichte oder Strukturbauteile im Schiffsbau und hält der Erosion durch Meerwasser und Salznebel lange stand.

Eisen weist eine relativ geringe chemische Stabilität auf und neigt zu oxidativer Korrosion, insbesondere in feuchter oder saurer Umgebung. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen weisen jedoch üblicherweise einen geringen Eisengehalt (2–5 %) auf, und Nickel kann den Eisenmangel bis zu einem gewissen Grad ausgleichen. Durch ein optimiertes Nickel-Eisen-Verhältnis (z. B. 90W-7Ni-3Fe) kann die Korrosionsbeständigkeit der Legierung nahezu dem von Nickelbasislegierungen entsprechen, während gleichzeitig eine hohe Dichte und Festigkeit erhalten bleibt. Die durch das Flüssigphasensintern entstehende dichte Struktur reduziert zudem die Freilegung von Poren und Korngrenzen und verringert so das Korrosionsrisiko weiter.

Die chemische Stabilität von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in Hochtemperaturumgebungen beruht auf der Oxidationsbeständigkeit von Wolfram und Nickel. Wolfram ist oxidationsbeständig, während die Nickeloxidschicht die Legierungsoberfläche vor weiteren Oxidationsreaktionen schützt. Dadurch behält die Legierung ihre Leistungsfähigkeit auch in heißer Luft oder sauerstoffhaltigen Umgebungen, wie beispielsweise in Komponenten der Luft- und Raumfahrt oder Abschirmmaterialien der Nuklearindustrie. Zu beachten ist, dass ein zu hoher Eisengehalt zu erhöhter Oxidation bei hohen Temperaturen führen kann. Daher werden für Hochtemperaturanwendungen üblicherweise eisenarme Formulierungen gewählt.

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen finden auch in der Medizin- und Nuklearindustrie wichtige Anwendungsmöglichkeiten. Beispielsweise muss die Legierung in Strahlenschutzgeräten lange Zeit Strahlung und Feuchtigkeit ausgesetzt sein. Ihre hervorragende Korrosionsbeständigkeit gewährleistet die langfristige Zuverlässigkeit und Sicherheit der Geräte. Kurz gesagt: Die chemische Stabilität der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist eine wichtige Voraussetzung für ihre Anwendung in vielen Bereichen. Zusammen mit ihrer hohen Dichte und ihren mechanischen Eigenschaften ist sie eine ideale Wahl für Hochleistungswerkstoffe.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 2.3.1 Korrosionsbeständigkeit

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen zeichnen sich durch ihre chemische Stabilität aus, die einen langjährigen Einsatz in verschiedenen korrosiven Umgebungen ermöglicht. Die Korrosionsbeständigkeit beruht hauptsächlich auf der hervorragenden Korrosionsbeständigkeit von Wolfram und Nickel. Obwohl die Zugabe von Eisen diese Eigenschaften leicht reduziert, weist die Legierung insgesamt durch präzise Steuerung des Zusammensetzungsverhältnisses dennoch eine gute Korrosionsbeständigkeit auf. Aufgrund ihrer Korrosionsbeständigkeit findet die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung breite Anwendung im Schiffsbau, der chemischen Industrie, der Medizintechnik und der Nuklearindustrie, insbesondere in Umgebungen, die Korrosion durch Säuren, Laugen oder Salzsprühnebel widerstehen müssen.

Wolfram ist chemisch extrem stabil und weist eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit gegenüber den meisten Säuren und Laugen auf. Beispielsweise reagiert Wolfram bei Raumtemperatur kaum auf Salzsäure, Schwefelsäure und verdünnte Salpetersäure und korrodiert bei hohen Temperaturen in konzentrierter Salpetersäure oder Flusssäure nur geringfügig. Diese Eigenschaft ermöglicht es Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen, ihre strukturelle Integrität auch in sauren Umgebungen zu bewahren. Daher eignen sie sich für den Einsatz in Gegengewichten oder Strukturkomponenten in der chemischen Industrie, beispielsweise in korrosionsbeständigen Komponenten von Reaktionsbehältern oder Rohrleitungen. Die Kombination aus hoher Dichte und Korrosionsbeständigkeit von Wolfram ermöglicht zuverlässige Leistung auf kleinem Raum.

Die Zugabe von Nickel erhöht die Korrosionsbeständigkeit der Legierung deutlich. Nickel weist eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen Feuchtigkeit, Salznebel und alkalische Umgebungen auf, insbesondere in Meeresumgebungen. In Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen bildet Nickel (üblicherweise 5–10 %) eine Flüssigphasen-Sintermatrix, die eine dichte Oxidschutzschicht (hauptsächlich NiO) auf der Oberfläche der Legierung bilden kann und so weitere Erosion durch korrosive Medien wirksam verhindert. Beispielsweise behält die Legierung 90W-7Ni-3Fe ihre Oberflächenstabilität über lange Zeit in Meerwasser- oder Salznebelumgebungen und eignet sich für Gegengewichte oder Strukturkomponenten im Schiffsbau, wie z. B. Schiffsausgleichsblöcke oder Schiffsbohrgeräte.

Eisen weist eine relativ geringe Korrosionsbeständigkeit auf, insbesondere in feuchter oder saurer Umgebung, wo es anfällig für Oxidation ist. Aufgrund des geringen Eisengehalts in Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen (üblicherweise 2–5 %) und des Nickelanteils, der den Eisenmangel ausgleichen kann, ist die Korrosionsbeständigkeit der Legierung dennoch hoch. Die durch das Flüssigphasensintern entstehende dichte Struktur (Dichte nahe 99 %) reduziert zusätzlich die Freilegung von Poren und Korngrenzen und verringert so das Eindringen korrosiver Medien. Durch die Optimierung des Nickel-Eisen-Verhältnisses lässt sich zudem ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Kosten und Leistung erzielen. Beispielsweise kann eine Erhöhung des Nickelgehalts (z. B. 7–10 %) die Korrosionsbeständigkeit deutlich verbessern und ist für den Einsatz in rauen chemischen Umgebungen geeignet. Die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung zeichnet sich auch durch ihre Oberflächenqualität und Verarbeitungstechnologie aus. Polieren oder Beschichten kann die Korrosionsbeständigkeit der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Legierung weiter verbessern und die korrosionsfördernde Wirkung von Oberflächendefekten reduzieren. In der Praxis wird die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung häufig zur Herstellung von Strahlenschutzkomponenten medizinischer Geräte, beispielsweise von Schutzabdeckungen für CT-Geräte, verwendet. Ihre Korrosionsbeständigkeit gewährleistet die Zuverlässigkeit der Geräte im Langzeiteinsatz in feuchten oder sterilisierten Umgebungen. Auch in der Nuklearindustrie wird die Legierung zur Herstellung von Behältern für radioaktive Abfälle eingesetzt, wobei ihre Korrosionsbeständigkeit die Sicherheit der Behälter in komplexen Umgebungen gewährleistet.

### 2.3.2 Antioxidative Eigenschaften

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sind ein wichtiges Merkmal für die Aufrechterhaltung ihrer Leistungsfähigkeit in Hochtemperatur- oder sauerstoffhaltigen Umgebungen. Oxidationsbeständigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Materials, Oxidationsreaktionen zu widerstehen und Leistungseinbußen durch Hochtemperaturoxidation zu vermeiden. Die Oxidationsbeständigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen beruht hauptsächlich auf der chemischen Stabilität von Wolfram und Nickel, während die Zugabe von Eisen die Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen beeinflusst. Durch eine sinnvolle Formelgestaltung kann die Legierung jedoch eine gute Stabilität in Hochtemperaturluft oder anderen oxidierenden Umgebungen aufweisen.

Wolfram besitzt eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit und reagiert bei Raumtemperatur bis mittleren Temperaturen (unter ca. 800 °C) kaum mit Sauerstoff. Unter Hochtemperaturbedingungen bildet Wolfram langsam Oxide (wie  $WO_3$ ). Aufgrund seines hohen Wolframgehalts (85–95 %) und seiner dichten Struktur in Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen bleibt die Oxidationsreaktion jedoch meist auf die Oberfläche beschränkt und verläuft langsam. Diese Eigenschaft ermöglicht Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen, ihre strukturelle Integrität auch bei hohen Temperaturen zu bewahren. Sie eignen sich daher für Hochtemperaturkomponenten in der Luft- und Raumfahrt sowie im militärischen Bereich, wie beispielsweise Gegengewichte für Turbinenschaufeln oder panzerbrechende Projektilkerne.

Die Oxidationsbeständigkeit von Nickel ist die wichtigste Garantie für Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in Hochtemperaturumgebungen. Nickel bildet auf der Oberfläche eine stabile Oxidschutzschicht, die das Eindringen von Sauerstoff in die Legierung wirksam verhindert. Diese Oxidschicht bleibt auch bei hohen Temperaturen (ca. 600–1000 °C) stabil und verleiht der Legierung eine lange Lebensdauer in sauerstoffhaltigen Umgebungen. Beispielsweise wird Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung in der Luft- und Raumfahrt zur Herstellung von Hochtemperatur-Rotationsteilen verwendet. Ihre Oxidationsbeständigkeit gewährleistet, dass die Teile in Hochtemperaturluft keine nennenswerten Leistungseinbußen erfahren.

Eisen weist eine geringe Oxidationsbeständigkeit auf, insbesondere bei hohen Temperaturen, da sich dort leicht Eisenoxid ( $Fe_2O_3$  oder  $Fe_3O_4$ ) bildet, das zu oxidativer Korrosion an der Legierungsoberfläche führen kann. Aufgrund des geringen Eisengehalts (2–5 %) und des Nickelanteils, der die Oxidationsneigung des Eisens mindert, ist die Oxidationsbeständigkeit der Legierung jedoch insgesamt hoch. Die durch Flüssigphasensintern entstehende dichte Mikrostruktur verkleinert die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sauerstoffdurchlässigkeit zusätzlich und erhöht die Oxidationsbeständigkeit. Bei Hochtemperaturanwendungen werden üblicherweise Formeln mit geringem Eisengehalt (z. B. 90W-7Ni-3Fe) gewählt, um die Oxidationsbeständigkeit zu optimieren.

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen werden häufig in Umgebungen mit hohen Temperaturen und oxidierenden Substanzen eingesetzt. In der Nuklearindustrie wird die Legierung beispielsweise zur Herstellung von Strahlenschutzbehältern verwendet, die in Umgebungen mit hohen Temperaturen oxidationsbeständig sind und langfristige Zuverlässigkeit gewährleisten. Im medizinischen Bereich gewährleistet die Oxidationsbeständigkeit der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung die Stabilität von Strahlenschutzgeräten bei Sterilisation bei hohen Temperaturen oder längerer Luftfeinwirkung. Prozessoptimierungen können die Dichte der Legierung weiter erhöhen und oxidationsempfindliche Mikrodefekte reduzieren, wodurch die Oxidationsbeständigkeit verbessert wird.

### 2.3.3 Chemische Reaktionen mit anderen Materialien

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen mit anderen Materialien ist ein wichtiger Aspekt und bestimmt ihre Anwendbarkeit in komplexen chemischen Umgebungen. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen weisen im Allgemeinen eine geringe chemische Aktivität auf und reagieren bei Raumtemperatur nicht signifikant mit den meisten Materialien. Diese Reaktionsträgheit beruht hauptsächlich auf der hohen chemischen Stabilität von Wolfram und Nickel, die es der Legierung ermöglicht, mit einer Vielzahl von Materialien zu koexistieren, ohne schädliche chemische Reaktionen auszulösen. Unter bestimmten Bedingungen (z. B. bei hohen Temperaturen oder in stark korrosiver Umgebung) kann die Legierung jedoch eingeschränkt mit bestimmten Materialien reagieren, was je nach Anwendungsumgebung bewertet werden muss.

Der hohe Wolframgehalt der Legierung macht sie gegenüber den meisten gängigen Materialien (z. B. Wasser, Luft, Salzlösungen) chemisch inert. Wolfram reagiert nur sehr wenig mit Säuren (z. B. Salzsäure, Schwefelsäure) und löst sich bei hohen Temperaturen nur geringfügig in konzentrierter Salpetersäure oder Flusssäure. Bei Kontakt mit metallischen Werkstoffen verursachen Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in der Regel keine nennenswerte galvanische Korrosion, da das Elektrodenpotenzial von Wolfram hoch ist und die Nickeloxidschicht die Legierungsoberfläche schützt. Beispielsweise bleiben Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in mechanischen Teilen, die mit Aluminium oder Stahl in Kontakt kommen, stabil und eignen sich als Gegengewichte oder Verbindungsteile.

Die chemische Inertheit von Nickel erhöht die Verträglichkeit der Legierung mit anderen Materialien zusätzlich. Nickel weist eine gute Korrosionsbeständigkeit gegenüber alkalischen Substanzen und neutralen Lösungen (wie Wasser oder Salzwasser) auf und reagiert chemisch nicht leicht mit gewöhnlichen Metallen oder nichtmetallischen Werkstoffen. In medizinischen Geräten werden Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen häufig zusammen mit Materialien wie Kunststoff, Keramik oder Glas verwendet. Beispielsweise reagiert die Legierung in den Strahlenschutzkomponenten von CT-Geräten nicht offensichtlich chemisch mit den umgebenden nichtmetallischen Werkstoffen und bleibt langfristig stabil. Das Vorhandensein von Eisen kann unter bestimmten Bedingungen chemische Reaktionen auslösen, insbesondere in feuchter oder saurer Umgebung, in der Eisen mit Sauerstoff oder Chloriden

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oxidieren oder korrodieren kann. Aufgrund des geringen Eisengehalts (2–5 %) und der schützenden Wirkung von Nickel und Wolfram bleiben diese Reaktionen jedoch meist auf die Oberfläche beschränkt und verlaufen langsam. Bei hohen Temperaturen kann Eisen mit Sauerstoff oder Sulfiden reagieren und Oxide oder Sulfide bilden. Daher sollten Legierungen mit niedrigem Eisengehalt in korrosiven Umgebungen mit hohen Temperaturen sorgfältig ausgewählt werden.

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen erfordern in Verbindung mit bestimmten Materialien besondere Aufmerksamkeit. Beispielsweise kann die Legierung bei Kontakt mit starken Oxidationsmitteln (wie konzentrierter Salpetersäure oder Peroxiden) bei hohen Temperaturen langsam oberflächlich oxidieren. Eine Oberflächenbehandlung (z. B. eine Beschichtung) ist dann erforderlich, um den Schutz zu erhöhen. Wolfram kann zudem bei Kontakt mit fluorhaltigen Materialien oder Flusssäure leicht reagieren, weshalb von der Verwendung in stark fluorierten Umgebungen abgeraten wird. Die geringe chemische Aktivität der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ermöglicht eine sichere Koexistenz mit den meisten Materialien in verschiedenen Umgebungen und eignet sich besonders für die Herstellung von Mehrmaterial-Verbundstrukturen.

## 2.4 Elektromagnetische und andere besondere Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sind nicht nur für ihre hohe Dichte und hervorragenden mechanischen Eigenschaften bekannt, sondern bieten aufgrund ihrer elektromagnetischen Eigenschaften und anderer besonderer Eigenschaften auch einzigartige Vorteile für bestimmte Anwendungen. Zu den elektromagnetischen Eigenschaften gehören magnetische Eigenschaften, elektrische Leitfähigkeit und spezifischer Widerstand, die durch die Zusammensetzung und Mikrostruktur der Legierung bestimmt werden. Die hohe Dichte und chemische Stabilität von Wolfram bilden die Grundlage der Legierung, während die Zugabe von Nickel und Eisen ihr spezifische elektromagnetische Eigenschaften verleiht, die sie für die Luft- und Raumfahrt, die Elektronik und das Militär geeignet machen. Im Folgenden werden die magnetischen Eigenschaften, die elektrische Leitfähigkeit und der spezifische Widerstand der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung im Detail untersucht.

### 2.4.1 Magnetische Eigenschaften

Die magnetischen Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden hauptsächlich durch den Ferromagnetismus von Nickel und Eisen bestimmt, während Wolfram selbst ein nicht magnetisches (paramagnetisches) Material ist. Nickel und Eisen sind beides ferromagnetische Elemente, die in einem äußeren Magnetfeld magnetisiert werden können. Daher weisen Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in der Regel einen schwachen Ferromagnetismus auf, wobei die spezifischen magnetischen Eigenschaften vom Gehalt und Verhältnis von Nickel und Eisen abhängen. Generell gilt, dass Legierungen mit einem höheren Nickelgehalt (z. B. 7–10 %) (z. B. 90W-7Ni-3Fe) einen stärkeren Magnetismus aufweisen. Ein steigender Eisengehalt (z. B. 3–5 %) erhöht die Magnetisierungsintensität weiter, der Gesamtmagnetismus ist jedoch immer noch deutlich geringer als der von reinem Nickel oder reinem Eisen. Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen bieten Vorteile in bestimmten Anwendungsbereichen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beispielsweise können die magnetischen Eigenschaften der Legierung in Bereichen genutzt werden, in denen magnetische Positionierung oder elektromagnetische Abschirmung erforderlich sind, beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt zur Herstellung elektromagnetisch verträglicher Gegengewichte oder Sensorkomponenten. Die Magnetisierungsstärke der Legierung (die Sättigungsmagnetisierung liegt üblicherweise im Bereich von 0,1–0,3 T) reicht für diese Anwendungen aus, ohne Präzisionselektronik durch übermäßigen Magnetismus zu beeinträchtigen. Zusätzlich kann der Magnetismus der Legierung durch Wärmebehandlung oder Anpassung der Zusammensetzung optimiert werden, beispielsweise durch Reduzierung innerer Spannungen durch Glühen, um die Stabilität der magnetischen Eigenschaften weiter zu verbessern.

Die Mikrostruktur hat auch einen wichtigen Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung. Die durch Flüssigphasensintern entstehende dichte Struktur sorgt dafür, dass Nickel und Eisen gleichmäßig um die Wolframpartikel verteilt werden und eine durchgehende magnetische Matrix bilden. Diese Struktur trägt dazu bei, die magnetische Permeabilität zu verbessern und gleichzeitig den Hystereseverlust zu reduzieren, wodurch die Legierung in dynamischen Magnetfeldern besser reagiert. Ein zu hoher Eisengehalt kann jedoch zu Instabilitäten der magnetischen Eigenschaften führen, insbesondere bei hohen Temperaturen oder in korrosiven Umgebungen, wo Eisenoxidation die Eigenschaften der magnetischen Matrix beeinträchtigen kann. Daher wird bei der Entwicklung von Legierungen der Eisengehalt üblicherweise auf einem niedrigen Niveau (z. B. 2–5 %) gehalten, um Magnetismus und Korrosionsbeständigkeit auszugleichen.

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen bieten auch potenzielle Anwendungsmöglichkeiten im militärischen Bereich. Beispielsweise kann der schwache Magnetismus der Legierung in elektromagnetisch angetriebenen Waffensystemen oder Magnetsensoren eine moderate magnetische Reaktion erzeugen, während ihre hohe Dichte und Festigkeit die strukturellen Anforderungen erfüllen. Im medizinischen Bereich müssen die magnetischen Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sorgfältig geprüft werden. Beispielsweise muss beim Einsatz in der Nähe von MRT-Geräten sichergestellt werden, dass der schwache Magnetismus die Gleichmäßigkeit des Magnetfelds nicht beeinträchtigt.

#### 2.4.2 Leitfähigkeit

Die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist ein wichtiger Indikator für ihre elektromagnetischen Eigenschaften, da sie die Fähigkeit des Materials widerspiegelt, elektrischen Strom zu leiten. Die elektrische Leitfähigkeit wird üblicherweise in Siemens pro Meter (S/m) angegeben, was dem Kehrwert des spezifischen Widerstands entspricht. Die elektrische Leitfähigkeit einer Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung wird von ihrer Zusammensetzung und Mikrostruktur beeinflusst. Wolfram hat eine höhere elektrische Leitfähigkeit (etwa  $1,82 \times 10^7$  S/m), während Nickel (etwa  $1,43 \times 10^7$  S/m) und Eisen (etwa  $1,0 \times 10^7$  S/m) eine etwas geringere elektrische Leitfähigkeit haben. Da Wolfram in der Legierung dominiert (85–95 %), liegt die elektrische Leitfähigkeit einer Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung üblicherweise zwischen  $1,0 \times 10^7$  und  $1,5 \times 10^7$  S/m und ist damit niedriger als bei reinem Wolfram, aber höher als bei gewöhnlichem Stahl.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die hohe elektrische Leitfähigkeit verleiht WNiFe -Legierungen Vorteile in Anwendungen, die eine hohe Stromleitung erfordern. In der Elektronikindustrie kann die Legierung beispielsweise zur Herstellung von Elektroden oder Verbindungselementen verwendet werden. Ihre hohe Dichte und elektrische Leitfähigkeit sorgen für eine effiziente Stromübertragung und strukturelle Stabilität. In der Luft- und Raumfahrt werden WNiFe -Legierungen gelegentlich als Gegengewichte in elektrischen Systemen eingesetzt. Ihre elektrische Leitfähigkeit trägt dazu bei, ohmsche Wärmeverluste zu reduzieren und die Gesamteffizienz des Systems zu verbessern. Dank ihrer elektrischen Leitfähigkeit und ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit ( $100\text{--}130\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) eignet sich die Legierung zudem gut für Anwendungen, bei denen sowohl Wärme als auch Stromfluss gesteuert werden müssen, wie beispielsweise bei Kühlkörpern oder elektrischen Erdungskomponenten.

Die elektrische Leitfähigkeit hängt eng mit der Mikrostruktur der Legierung zusammen. Die durch Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen (HIP) gebildete dichte Struktur reduziert den Streueffekt an Korngrenzen und Poren und verbessert die Elektronenleitung. Das Nickel-Eisen-Verhältnis beeinflusst die elektrische Leitfähigkeit: Ein höherer Nickelgehalt trägt zu einer höheren elektrischen Leitfähigkeit bei, während ein höherer Eisengehalt die Gesamtleitfähigkeit der Legierung aufgrund der geringeren elektrischen Leitfähigkeit leicht verringern kann. Daher werden bei Anwendungen, die eine hohe elektrische Leitfähigkeit erfordern, üblicherweise Legierungen mit hohem Wolfram- und niedrigem Eisengehalt, wie beispielsweise 95W-4Ni-1Fe, gewählt.

Es ist zu beachten, dass die elektrische Leitfähigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen bei hohen Temperaturen leicht abnehmen kann, da die steigende Temperatur die Elektronenstreuung verstärkt und die Leitfähigkeitseffizienz verringert. Aufgrund des hohen Schmelzpunkts und der thermischen Stabilität von Wolfram ändert sich die Leitfähigkeit der Legierung in Hochtemperaturumgebungen jedoch relativ wenig, sodass sie sich für den Einsatz in Hochtemperatur-Elektronikgeräten eignet. Insgesamt macht die elektrische Leitfähigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen diese für elektrische und elektronische Anwendungen geeignet, insbesondere in Szenarien, in denen hohe Dichte und Leitfähigkeit erforderlich sind.

### 2.4.3 Spezifischer Widerstand

Der elektrische Widerstand ist der Kehrwert der Leitfähigkeit und gibt die Fähigkeit eines Materials an, den Durchgang von elektrischem Strom zu blockieren. Er wird üblicherweise in Ohmmeter ( $\Omega\cdot\text{m}$ ) angegeben. Der spezifische Widerstand einer Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung liegt im Allgemeinen zwischen  $6,7 \times 10^{-8}$  und  $1,0 \times 10^{-7} \Omega\cdot\text{m}$ , der genaue Wert hängt vom Zusammensetzungsverhältnis und der Mikrostruktur ab. Wolfram hat einen niedrigen spezifischen Widerstand (etwa  $5,5 \times 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$ ), während Nickel (etwa  $7,0 \times 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$ ) und Eisen (etwa  $1,0 \times 10^{-7}$ ) einen niedrigen spezifischen Widerstand haben. Da Wolfram der Hauptbestandteil der Legierung ist, liegt der spezifische Widerstand der Legierung nahe an dem von Wolfram, ist jedoch geringfügig höher als der von reinem Wolfram.

Der geringere spezifische Widerstand verschafft der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung einen Vorteil bei Anwendungen, die eine effiziente Stromleitung erfordern. Beispielsweise kann die Legierung in

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

elektronischen Geräten als leitfähiges Bauteil oder Elektrodenmaterial eingesetzt werden. Ihr geringer Widerstand reduziert den Energieverlust, während ihre hohe Dichte strukturelle Anforderungen erfüllt. Im militärischen Bereich macht der geringe Widerstand der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung sie potenziell für elektromagnetische Antriebssysteme (wie elektromagnetische Waffen) geeignet, die hohe Ströme effizient leiten und gleichzeitig hohen Belastungen und kurzzeitig hohen Temperaturen standhalten.

Der spezifische Widerstand hängt eng mit der Mikrostruktur der Legierung zusammen. Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen in pulvermetallurgischen Verfahren können eine hochdichte Struktur bilden, die durch Korngrenzen und Defekte verursachten Hindernisse für die Elektronenleitung reduzieren und so den spezifischen Widerstand senken. Das Verhältnis von Nickel zu Eisen beeinflusst den spezifischen Widerstand: Ein höherer Eisengehalt erhöht den spezifischen Widerstand leicht, während die Zugabe von Nickel dazu beiträgt, den spezifischen Widerstand niedrig zu halten. Beispielsweise beträgt der spezifische Widerstand der Legierung 90W-7Ni-3Fe etwa  $8,0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ , während der spezifische Widerstand der Legierung 95W-4Ni-1Fe nur  $7,0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$  betragen kann.

In Hochtemperaturumgebungen steigt der spezifische Widerstand der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung aufgrund verstärkter Elektronenstreuung mit steigender Temperatur leicht an. Der hohe Schmelzpunkt und die thermische Stabilität von Wolfram sorgen jedoch dafür, dass sich der spezifische Widerstand kaum ändert, sodass die Legierung in elektronischen Hochtemperaturanwendungen eine gute Leitfähigkeit behält. Darüber hinaus ermöglicht der spezifische Widerstand der Legierung in Kombination mit ihrer Korrosionsbeständigkeit stabile elektrische Eigenschaften in feuchten oder chemischen Umgebungen. Dies macht sie für den Einsatz in leitfähigen Teilen im Schiffsbau oder der chemischen Industrie geeignet.

#### 2.4.4 Strahlungsbeständigkeit

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen sind eine ihrer wichtigsten Eigenschaften in der Nuklearindustrie und im medizinischen Bereich und werden daher bevorzugt als Strahlenschutzmaterial verwendet. Die Strahlungsresistenz beruht hauptsächlich auf der hohen Ordnungszahl ( $Z = 74$ ) und der hohen Dichte von Wolfram (die Legierungsdichte liegt üblicherweise zwischen  $16,5$  und  $18,75 \text{ g/cm}^3$ ), wodurch die Legierung hochenergetische Strahlung wie Röntgen-, Gamma- und Neutronenstrahlen stark absorbieren und abschirmen kann. Obwohl Nickel und Eisen als Bindephasen weniger zur Strahlenabschirmung beitragen, kann ihre Strahlungsresistenz durch Optimierung der Mikrostruktur und des Zusammensetzungsverhältnisses der Legierung weiter verbessert werden.

Die hohe Ordnungszahl von Wolfram verleiht ihm einen hohen photoelektrischen Effekt und eine hohe Compton-Streuwahrscheinlichkeit bei der Wechselwirkung mit hochenergetischen Photonen (wie Röntgen- und Gammastrahlen), wodurch die Strahlungsenergie effektiv gedämpft wird. Im Vergleich zu herkömmlichen Abschirmmaterialien wie Blei (Dichte  $11,34 \text{ g/cm}^3$ ,  $Z = 82$ ) weist die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung eine höhere Dichte und mechanische Festigkeit auf und kann die gleiche

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Abschirmwirkung bei geringerer Dicke erzielen, wobei die Toxizität und die Umweltprobleme von Blei vermieden werden. Im medizinischen Bereich wird die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung beispielsweise häufig zur Herstellung von Schutzabdeckungen für CT-Geräte und Röntgenanlagen verwendet. Ihre hohe Dichte ermöglicht die Konstruktion kompakterer Geräte und reduziert den Platzbedarf.

In der Nuklearindustrie eignet sich die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung aufgrund ihrer Strahlungsbeständigkeit für Behälter für radioaktive Abfälle und Abschirmkomponenten für Kernreaktoren. Die Legierung schirmt nicht nur Gammastrahlen effektiv ab, sondern besitzt auch ein gewisses Absorptionsvermögen für Neutronenstrahlung. Neutronenabschirmung erfordert üblicherweise die Kombination anderer Materialien (wie Borverbindungen). Die hohe Dichte und strukturelle Stabilität der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung machen sie jedoch zu einem idealen Substrat für Verbundabschirmsysteme. Darüber hinaus gewährleisten die Korrosionsbeständigkeit und die thermische Stabilität der Legierung ihre Zuverlässigkeit im Langzeiteinsatz in Strahlungsumgebungen, z. B. ohne Leistungseinbußen bei hohen Temperaturen oder hoher Luftfeuchtigkeit.

Die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist eng mit ihrer Mikrostruktur verbunden. Flüssigphasensintern und heißisostatisches Pressen (HIP) im Pulvermetallurgieverfahren ermöglichen es der Legierung, eine Dichte nahe dem theoretischen Wert (über 99 %) zu erreichen. Dadurch werden Porosität und Defekte reduziert und das Risiko von Strahlungsdurchdringung verringert. Das Verhältnis von Nickel zu Eisen hat wenig Einfluss auf die Abschirmleistung. Ein hoher Wolframgehalt (z. B. 95W-4Ni-1Fe) weist jedoch in der Regel eine bessere Strahlungsbeständigkeit auf, da der Wolframgehalt die Dichte und das Strahlungsabsorptionsvermögen der Legierung direkt bestimmt.

Es ist zu beachten, dass die Langzeitstabilität von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in stark strahlenbelasteten Umgebungen durch Nickel und Eisen beeinträchtigt werden kann. Nickel und Eisen können unter hochdosierter Strahlung leichte Veränderungen ihrer Kristallstruktur erfahren, was zu geringfügigen Leistungseinbußen führt. Daher ist es in extrem strahlenbelasteten Umgebungen notwendig, die Strahlenbeständigkeit durch Oberflächenbeschichtung oder eine optimierte Formulierung (z. B. durch Reduzierung des Eisengehalts) weiter zu verbessern. Insgesamt bietet die Strahlenbeständigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen erhebliche Vorteile für Anwendungen in der Medizin, Nukleartechnik und Luft- und Raumfahrt (z. B. im Strahlenschutz von Satelliten).

## 2.5 CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung MSDS

**Chemikalien und Firmenlogos :** Bei diesem Material handelt es sich um eine Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung, hergestellt von CTIA GROUP LTD. Zusammensetzung/ Zusammensetzungsinformationen: Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist eine hochdichte Legierung, die hauptsächlich aus folgenden Komponenten besteht: Wolfram (W, CAS-Nr.: 7440-33-7, 85–95 %), Nickel (Ni, CAS-Nr.: 7440-02-0, 5–10 %) und Eisen (Fe, CAS-Nr.: 7439-89-6, 2–5 %). Die Legierung wird pulvermetallurgisch hergestellt. Wolfram ist die Hauptkomponente, Nickel und Eisen bilden die Bindephase. Spuren von Verunreinigungen können vorhanden sein, beeinträchtigen jedoch nicht die Leistung. Gefahrenübersicht : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sind in Massenform relativ sicher.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1. Physikalische und chemische Eigenschaften

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist ein silbergrauer metallischer Feststoff mit einer Dichte von 16,5–18,75 g/cm<sup>3</sup>. Aufgrund der Nickel-Eisen-Matrix liegt ihr Schmelzpunkt bei etwa 1450–1500 °C. Sie ist wasserunlöslich und beständig gegen die meisten Säure- und Laugenkorrosionen. In Blockform ist sie stabil.

## 2. Stabilität und Reaktivität

Die Legierung ist bei Raumtemperatur chemisch stabil, sollte jedoch bei hohen Temperaturen den Kontakt mit starken Oxidationsmitteln (wie Salpetersäure, Peroxid) oder Flusssäure vermeiden. Zu den verbotenen Materialien gehören starke Oxidationsmittel und Schwefel, um mögliche chemische Reaktionen zu verhindern.

## 3. Toxikologische Informationen

Nickelverbindungen werden von der IARC als Karzinogene der Klasse 1 eingestuft. Langfristiges Einatmen von Nickelstaub kann Atemwegserkrankungen oder allergische Reaktionen hervorrufen. Wolfram und Eisen sind weniger giftig, das Einatmen von Staub kann jedoch mechanische Reizungen verursachen. Langfristige Staubbelastung sollte vermieden werden.

## 4. Ökologische Informationen

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sind wasserunlöslich und haben geringe Auswirkungen auf die Umwelt. Um die ökologische Sicherheit zu gewährleisten, müssen Abfälle jedoch gemäß den Umweltvorschriften entsorgt werden.

## 5. Versandinformationen

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sind kein Gefahrgut und können wie normale Metalle transportiert werden.

## 6. Regulatorische Informationen

Dieses Sicherheitsdatenblatt entspricht GB/T 16483-2008 Inhalt und Reihenfolge der chemischen Sicherheitsdatenblätter. Nickel

## 7. Sonstige Informationen

Dieses Sicherheitsdatenblatt basiert auf einer typischen Formel für eine Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung. Die spezifischen Daten können aufgrund unterschiedlicher Formeln leicht variieren.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**CTIA GROUP LTD**  
**Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction**

**1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy**

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

**2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy**

**High Density:** Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm<sup>3</sup>.

**High Strength:** Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

**Other Characteristics:** Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

**3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades**

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
<b>Composition (%)</b>	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
<b>Density (g/cm<sup>3</sup>)</b>	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
<b>Heat Treatment</b>	Sintering						
<b>Tensile Strength (PSI)</b>	900~1000		900~1100		920~1100		
<b>Elongation (%)</b>	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
<b>Hardness (HRC)</b>	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

**4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy**

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

**4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy**

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

**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)

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Kapitel 3 Herstellung und Verarbeitung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen

### 3.1 Rohstoffauswahl und Vorbehandlung

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen haben einen entscheidenden Einfluss auf ihre endgültige Leistung. Die Auswahl und Vorbehandlung der Rohstoffe sind der Ausgangspunkt des gesamten Prozesses, der die Reinheit, Mikrostruktur und Leistungsstabilität der Legierung direkt bestimmt. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden hauptsächlich durch ein pulvermetallurgisches Verfahren hergestellt, das die Auswahl und Vorbehandlung von drei Hauptrohstoffen umfasst: Wolfram, Nickel und Eisen. Reinheit, Partikelgröße und chemische Eigenschaften der Rohstoffe wirken sich stark auf den Sintereffekt, die Dichte und die mechanischen Eigenschaften der Legierung aus. Deshalb sind eine wissenschaftliche und vernünftige Auswahl der Rohstoffe und ein Vorbehandlungsprozess die wichtigsten Bindeglieder zur Sicherstellung der Qualität der Legierung. Im Folgenden werden die Reinheitsanforderungen von Wolfram, Nickel und Eisen sowie der Vorbehandlungsprozess der Rohstoffe im Detail erörtert.

#### 3.1.1 Reinheitsanforderungen für Wolfram, Nickel und Eisen

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen sind stark von der Reinheit der Rohstoffe abhängig, da Verunreinigungen mikrostrukturelle Defekte, Leistungseinbußen oder erhöhte Verarbeitungsschwierigkeiten verursachen können. Wolfram, Nickel und Eisen sind die Hauptbestandteile der Legierung. Ihre Reinheitsanforderungen richten sich in der Regel nach dem Anwendungsszenario (z. B. Luft- und Raumfahrt, Militär oder Medizin) und den Leistungsanforderungen. Im Folgenden sind die Reinheitsanforderungen der einzelnen Elemente und ihre Auswirkungen auf die Leistung der Legierung aufgeführt.

**Wolfram (W)** : Wolfram ist mit 85–95 % der Hauptbestandteil von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Seine Reinheit ist entscheidend für Dichte, Härte und Strahlenbeständigkeit der Legierung. Die Industrie verlangt üblicherweise eine Reinheit von Wolframpulver von 99,9 % (3N) oder höher, vorzugsweise über 99,95 % (4N), um den Einfluss von Verunreinigungen wie Sauerstoff, Kohlenstoff und Schwefel zu reduzieren. Ein zu hoher Sauerstoffgehalt ( $> 0,05$  %) kann beim Sintern zur Bildung von Oxideinschlüssen führen, die die Dichte und die mechanischen Eigenschaften der Legierung verringern. Kohlenstoff- oder Schwefelverunreinigungen können zu Korngrenzenversprödung führen und die Zähigkeit beeinträchtigen. Für hochpräzise Anwendungen ist hochreines Wolframpulver (99,99 %) erforderlich, um eine ausgezeichnete Strahlenbeständigkeit und chemische Stabilität zu gewährleisten.

**Nickel (Ni)** : Nickel wirkt mit 5–10 % als Bindephase und verbessert die Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Legierung. Die Reinheit von Nickel muss üblicherweise 99,8 % (2N8) oder mehr erreichen, vorzugsweise 99,9 % (3N). Häufige Verunreinigungen in Nickel sind Schwefel, Phosphor und Silizium. Ein zu hoher Schwefelgehalt ( $> 0,01$  %) kann beim Sintern zur Bildung einer Phase mit niedrigem Schmelzpunkt führen und die thermische Stabilität der Legierung beeinträchtigen. Phosphor kann die Zähigkeit verringern und Silizium kann die Gleichmäßigkeit des Flüssigphasensinterns beeinträchtigen. Hochreines Nickel kann beim Flüssigphasensintern die Bildung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

einer stabilen Matrix sicherstellen, die Bindekraft der Wolframpartikel erhöhen und somit die Zugfestigkeit (800–1000 MPa) und Dehnung (10–20 %) der Legierung verbessern.

**Eisen (Fe)** : Eisen macht 2–5 % der Legierung aus und wird zur Erhöhung der Härte und zur Kostensenkung verwendet. Der Reinheitsbedarf liegt üblicherweise bei 99,5 % (2N5) oder höher. Die Hauptverunreinigungen im Eisen sind Sauerstoff, Kohlenstoff und Stickstoff. Ein zu hoher Sauerstoffgehalt (> 0,1 %) kann beim Sintern zur Bildung von Eisenoxid führen und die Korrosionsbeständigkeit verringern. Ein zu hoher Kohlenstoffgehalt (> 0,05 %) kann zur Karbidausscheidung führen und die Zähigkeit der Legierung beeinträchtigen. In einigen Anwendungen mit hoher Korrosionsbeständigkeit (z. B. im Schiffsbau) ist ein höherreineres Eisen (99,9 %) erforderlich, um die Korrosionsneigung zu verringern. Die Reinheit des Eisens beeinflusst auch die magnetischen Eigenschaften der Legierung. Ein geringerer Verunreinigungsgehalt trägt dazu bei, einen stabilen schwachen Ferromagnetismus aufrechtzuerhalten.

Um den Anforderungen unterschiedlicher Anwendungen gerecht zu werden, muss die Reinheit der Rohstoffe entsprechend der spezifischen Formel und den Leistungsanforderungen optimiert werden. Beispielsweise erfordert die Legierung 90W-7Ni-3Fe im militärischen Bereich (z. B. für panzerbrechende Kerne) eine hohe Dichte und Festigkeit, weshalb hochreines Wolfram (99,95 %) und Nickel (99,9 %) bevorzugt werden. Im zivilen Bereich (z. B. für Gewichte für Sportgeräte) kann die Reinheit des Eisens aus Kostengründen entsprechend reduziert werden. Lieferanten verwenden in der Regel Rohstoffe, die den ASTM B777- oder ISO-Standards entsprechen, um Reinheit und Konsistenz zu gewährleisten.

### 3.1.2 Rohstoffvorbehandlungsprozess

Die Vorbehandlung der Rohstoffe ist ein wichtiger Schritt bei der Herstellung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Ziel ist die Optimierung von Partikelgröße, Morphologie und chemischem Zustand der Wolfram-, Nickel- und Eisenpulver, um einen reibungslosen Ablauf der nachfolgenden Misch-, Press- und Sinterprozesse zu gewährleisten. Der Vorbehandlungsprozess umfasst Pulversiebung, Reinigung, Reduktion und Aktivierung. Jeder Schritt hat einen entscheidenden Einfluss auf die endgültige Leistung der Legierung.

**Pulversiebung** : Wolfram-, Nickel- und Eisenpulver müssen gesiebt werden, um zu große oder zu kleine Partikel zu entfernen und eine gleichmäßige Partikelgrößenverteilung zu gewährleisten. Die Partikelgröße von Wolframpulver liegt üblicherweise bei 1–10 µm, vorzugsweise 3–5 µm, um eine hohe Dichte und eine gleichmäßige Mikrostruktur beim Sintern zu gewährleisten.

Die Partikelgröße von Nickel- und Eisenpulver ist etwas größer, üblicherweise 5–20 µm, um die Fließfähigkeit beim Flüssigphasensintern zu verbessern. Die Siebung erfolgt üblicherweise mit einem Schwingsieb oder einer Luftstromklassifizierungsanlage, wobei die Siebgröße entsprechend der gewünschten Partikelgröße (z. B. 200–400 Maschenweite) gewählt wird. Eine gleichmäßige Partikelgrößenverteilung trägt zu einer gleichmäßigeren Mischung und Sintereffizienz bei und reduziert

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Porosität.

**Reinigung und Entfernung von Verunreinigungen** : Das Rohpulver kann Oberflächenoxide, Öl oder andere Verunreinigungen enthalten, die durch Reinigung entfernt werden müssen. Wolframpulver wird üblicherweise in einer verdünnten Säure (z. B. verdünnter Salzsäure) gereinigt, um Oberflächenoxide ( $WO_3$ ) zu entfernen. Anschließend wird es mit deionisiertem Wasser gespült und getrocknet. Nickel- und Eisenpulver sollten sorgfältig gereinigt werden, um die Bildung neuer Oxide zu vermeiden. Sie werden üblicherweise mit organischen Lösungsmitteln (z. B. Ethanol) gereinigt und anschließend im Vakuum oder unter Inertgas (z. B. Stickstoff) getrocknet. Der Reinigungsprozess muss zeitlich und temperaturgesteuert erfolgen, um Pulveragglomeration oder Veränderungen der chemischen Eigenschaften zu vermeiden.

**Reduktionsbehandlung** : Wolframpulver kann während des Herstellungsprozesses Oxide (wie  $WO_2$  oder  $WO_3$ ) enthalten, die durch eine Wasserstoffreduktion entfernt werden müssen. Die Reduktion erfolgt üblicherweise 1–2 Stunden lang in einem Wasserstoffofen bei 700–900 °C, um sicherzustellen, dass der Sauerstoffgehalt unter 0,05 % sinkt. Nickel- und Eisenpulver benötigen möglicherweise ebenfalls eine leichte Reduktion, um die oberflächliche Oxidschicht zu entfernen und die Sinteraktivität des Pulvers zu verbessern. Der Reduktionsprozess erfordert eine strenge Kontrolle der Atmosphärenreinheit (Wasserstoffreinheit > 99,99 %), um die Einführung neuer Verunreinigungen zu vermeiden.

**Pulveraktivierung** : Um die Sinteraktivität des Pulvers zu verbessern, kann das Wolframpulver mechanisch aktiviert werden, beispielsweise durch Hochenergie-Kugelmahlen. Durch das Kugelmahlen können die Wolframpartikel verfeinert (auf 1–3  $\mu\text{m}$ ), ihre Oberflächenenergie erhöht und die Verbindung mit Nickel und Eisen gefördert werden. Die Kugelmahlzeit beträgt üblicherweise 2–4 Stunden. Zu lange Mahlzeiten können Verunreinigungen einbringen oder zur Partikelagglomeration führen. Nickel- und Eisenpulver benötigen im Allgemeinen keine übermäßige Aktivierung, da ihre niedrigeren Schmelzpunkte ausreichen, um beim Sintern eine flüssige Phase zu bilden. Der Aktivierungsprozess muss in einer inerten Atmosphäre (z. B. Argon) durchgeführt werden, um Oxidation zu verhindern.

**Mischvorbehandlung** : Wolfram-, Nickel- und Eisenpulver müssen manchmal vorgemischt oder mit Additiven versetzt werden, um die Pulverfließfähigkeit zu verbessern. Beispielsweise kann eine kleine Menge organisches Bindemittel (z. B. Polyvinylalkohol, PVA, 0,1–0,5 %) hinzugefügt werden, um die Presseigenschaften des Pulvers zu verbessern. Das Vormischen erfolgt üblicherweise mit einem V-Mischer oder einem 3D-Mischer für 4–8 Stunden, um eine gleichmäßige Verteilung der Komponenten zu gewährleisten. Vermeiden Sie den Eintrag von Feuchtigkeit oder Luft während des Mischvorgangs, um Oxidation zu vermeiden.

Pulver mit zu großer Partikelgröße kann zu unvollständigem Sintern und reduzierter Dichte führen; ein zu hoher Sauerstoffgehalt kann Poren oder Einschlüsse verursachen und die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigen. Daher müssen die Prozessparameter der Vorbehandlung streng kontrolliert und die chemische Zusammensetzung der Rohstoffe mittels Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF) oder

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

induktiv gekoppelter Plasmaspektroskopie (ICP) analysiert werden, um die Einhaltung der Reinheits- und Qualitätsanforderungen sicherzustellen. Diese Schritte bilden eine solide Grundlage für die leistungsstarke Herstellung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen.

### 3.2 Herstellungsverfahren für Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen

von Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen erfolgt hauptsächlich durch Pulvermetallurgie, ein Verfahren zur Herstellung dichter Werkstoffe durch Mischen, Pressen und Sintern von Metallpulvern. Das pulvermetallurgische Verfahren überwindet wirksam die Verarbeitungsschwierigkeiten, die durch den hohen Schmelzpunkt (3410 °C) und die Sprödigkeit reiner Wolframwerkstoffe entstehen, und verleiht der Legierung gleichzeitig durch die Bindungswirkung von Nickel und Eisen hervorragende mechanische Eigenschaften und gute Bearbeitbarkeit. Der Herstellungsprozess von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen umfasst üblicherweise Schritte wie das Mischen der Rohstoffe, Pressen, Sintern und die Nachbearbeitung. Das Flüssigphasensintern ist dabei der Schlüssel zum Erreichen hoher Dichte und Leistung. Im Folgenden werden das pulvermetallurgische Verfahren und seine Kerntechnologie, das Flüssigphasensintern, im Detail erläutert.

#### 3.2.1 Pulvermetallurgie

Die Pulvermetallurgie ist das wichtigste industrielle Verfahren zur Herstellung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Sie eignet sich zur Herstellung von hochdichten (16,5–18,75 g/cm<sup>3</sup>) und hochfesten (Zugfestigkeit 800–1000 MPa) Legierungsteilen. Durch Mischen von hochreinem Wolfram-, Nickel- und Eisenpulver in einem bestimmten Verhältnis, Pressen und Sintern bei hohen Temperaturen entsteht eine dichte Legierungsstruktur. Die Vorteile liegen in der präzisen Kontrolle der Komponentenverhältnisse, der Erzielung komplexer geometrischer Formen und der Eignung für die Großserienproduktion. Im Folgenden werden die wichtigsten Schritte und technischen Aspekte der pulvermetallurgischen Herstellung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen erläutert.

**Mischen der Rohstoffe** : Der Herstellungsprozess beginnt mit dem Mischen von hochreinem Wolframpulver (Reinheit  $\geq 99,9\%$ , Partikelgröße 1–10 Mikrometer), Nickelpulver (Reinheit  $\geq 99,8\%$ , Partikelgröße 5–20 Mikrometer) und Eisenpulver (Reinheit  $\geq 99,5\%$ , Partikelgröße 5–20 Mikrometer) in einem Zielverhältnis (z. B. 90W-7Ni-3Fe). Das Mischen erfolgt üblicherweise 4–8 Stunden in einem V-Mischer oder einem 3D-Mischer, um eine gleichmäßige Verteilung der Komponenten zu gewährleisten. Der Mischvorgang muss unter Schutzgas (z. B. Argon oder Stickstoff) durchgeführt werden, um eine Oxidation des Pulvers zu verhindern. Um die Fließfähigkeit des Pulvers zu verbessern, kann eine kleine Menge organisches Bindemittel (z. B. Polyvinylalkohol, 0,1–0,5 %) hinzugefügt werden. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass es beim anschließenden Sintern vollständig verflüchtigt wird.

**Formpressen** : Das gemischte Pulver wird durch kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Formpressen zu einem Grünkörper gepresst. Das kaltisostatische Pressen erfolgt üblicherweise bei einem Druck von 100–200 MPa. Dadurch entsteht ein gleichmäßiger Grünkörper, der sich für die Herstellung komplex geformter Teile eignet. **Formpressen** eignet sich für einfache Formen, wobei der Druck üblicherweise

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

50–150 MPa beträgt. Während des Pressvorgangs müssen Druck und Haltezeit (üblicherweise 1–3 Minuten) kontrolliert werden, um sicherzustellen, dass der Grünkörper eine ausreichende Festigkeit (Grünfestigkeit) für die anschließende Handhabung aufweist. Die Dichte des Grünkörpers beträgt üblicherweise 50–70 % der theoretischen Dichte und bildet die Grundlage für das anschließende Sintern.

**Sintern** : Der gepresste Grünkörper wird bei hoher Temperatur gesintert, um eine dichte Legierungsstruktur zu bilden. Das Sintern erfolgt üblicherweise in einem Vakuum- oder Wasserstoffofen. Die Temperatur wird auf 1400–1550 °C geregelt. Dies liegt unter dem Schmelzpunkt von Wolfram, aber über den Schmelzpunkten von Nickel (1455 °C) und Eisen (1538 °C). Dadurch bilden Nickel und Eisen eine flüssige Phase und fördern die Bindung der Wolframpartikel. Die Sinterzeit beträgt je nach Grünkörpergröße und Zieldichte 1–4 Stunden. Nach dem Sintern kann die Dichte der Legierung über 99 % des theoretischen Werts erreichen, was die mechanischen Eigenschaften deutlich verbessert.

**Nachbearbeitung** : Sinterlegierungen können weitere Bearbeitungen wie Wärmebehandlung, mechanische Bearbeitung oder Oberflächenbehandlung erfordern. Wärmebehandlung (z. B. Glühen) kann **innere** Spannungen beseitigen und die Zähigkeit verbessern. Die endgültige Form wird durch mechanische Bearbeitung (z. B. Drehen, Fräsen oder Funkenerosion) hergestellt. Aufgrund der hohen Härte der Legierung (Vickershärte 250–400) sind Hartmetallwerkzeuge erforderlich. Oberflächenbehandlungen (z. B. Polieren oder Beschichten) können die Korrosions- oder Verschleißfestigkeit verbessern.

Der Vorteil der Pulvermetallurgie liegt in ihrer Flexibilität und Effizienz, die eine Vielzahl von Produkten von kleinen Präzisionsteilen bis hin zu großen Gegengewichten ermöglicht. Prozessparameter (wie Mischgleichmäßigkeit, Pressdruck und Sintertemperatur) müssen jedoch streng kontrolliert werden, um Probleme wie Porosität, Einschlüsse oder Komponentenseigerung zu vermeiden. Pulvermetallurgie kann zudem mit anderen Technologien (wie dem heißisostatischen Pressen) kombiniert werden, um die Leistung weiter zu optimieren. Dadurch finden Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, im Militär und in der Medizin.

### 3.2.2 Flüssigphasensintertechnologie

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierung , die für die Bildung einer hochdichten und leistungsstarken Legierungsstruktur verantwortlich ist. Im Vergleich zum Festphasensintern nutzt das Flüssigphasensintern die flüssigen Eigenschaften von Nickel und Eisen bei hohen Temperaturen, um die Bindungseffizienz der Wolframpartikel und die Dichte der Legierung deutlich zu verbessern. Der Schlüssel zum Flüssigphasensintern liegt in der Kontrolle von Sintertemperatur, Atmosphäre und Zeit, um die Bildung und gleichmäßige Verteilung der Flüssigphase zu gewährleisten und gleichzeitig ein Überbrennen oder einen Verlust der Flüssigphase zu vermeiden.

**Prinzip des Flüssigphasensinterns** : Während des Sinterprozesses steigt die Temperatur auf 1400–1550 °C, was den Schmelzpunkt von Nickel und Eisen übersteigt, aber deutlich unter dem Schmelzpunkt von Wolfram liegt. Nickel und Eisen verschmelzen zu einer flüssigen Phase, die die Lücken zwischen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

den Wolframpartikeln füllt und die Neuordnung und Bindung der Wolframpartikel durch Kapillarkwirkung fördert. Die Anwesenheit der flüssigen Phase reduziert die zum Sintern benötigte Temperatur und Zeit und erhöht gleichzeitig die Dichte (nahezu 99 %). Die Wolframpartikel bleiben fest und sind in die Nickel-Eisen-Matrix eingebettet, wodurch eine gleichmäßige Verbundstruktur entsteht. Dies verleiht der Legierung eine hohe Festigkeit (800–1000 MPa) und eine entsprechende Zähigkeit (Dehnung 10–20 %).

**Prozessbedingungen** : Flüssigphasensintern wird üblicherweise in einem Vakuum- oder Wasserstoffatmosphärenofen durchgeführt, um Oxidation zu verhindern. Eine Wasserstoffatmosphäre (Reinheit > 99,99 %) kann Spuren von Oxiden im Pulver effektiv entfernen und die Sinterqualität verbessern. Die Sintertemperatur muss präzise über dem Nickel-Eisen-Flüssigphasenbildungspunkt (ca. 1450 °C), aber unter der Temperatur übermäßiger Flüssigphasenverdampfung (ca. 1600 °C) kontrolliert werden. Die Haltezeit beträgt in der Regel 1–3 Stunden. Zu lange Haltezeiten können zu Flüssigphasenverlust oder Kornwachstum führen und so die Leistung mindern. Die Abkühlrate muss ebenfalls kontrolliert werden (üblicherweise 10–20 °C/min), um Mikrorisse durch thermische Spannung zu vermeiden .

**Einfluss der Mikrostruktur** : Die durch Flüssigphasensintern gebildete Mikrostruktur besteht aus Wolframpartikeln (Größe 10–50 µm) und einer Nickel-Eisen-Matrix. Die Wolframpartikel sind nahezu kugelförmig oder polygonal und gleichmäßig in der Matrix verteilt, was eine hohe Dichte und gleichmäßige mechanische Eigenschaften gewährleistet. Flüssigphasensintern kann die Porosität deutlich reduzieren (<1 %) und die Zugfestigkeit sowie Verschleißfestigkeit verbessern. Das Verhältnis von Nickel zu Eisen hat einen wichtigen Einfluss auf die Mikrostruktur: Ein höherer Nickelgehalt (z. B. 7 %) erhöht die Zähigkeit der Matrix, während ein höherer Eisengehalt (z. B. 3 %) die Härte erhöht.

**Technische Optimierung** : Um den Flüssigphasensintereffekt weiter zu verbessern, kann Heißisostatisches Pressen (HIP) als Zusatzverfahren eingesetzt werden. Nach dem Sintern wird der Grünkörper durch Heißisostatisches Pressen einem isotropen Druck von 100–200 MPa und einer Temperatur von 1200–1400 °C ausgesetzt, wodurch Restporen beseitigt und die Dichte auf über 99,5 % erhöht werden kann. Zusätzlich kann die Zugabe von Spurenelementen (wie Kobalt oder Kupfer) die Benetzbarkeit der Flüssigphase optimieren und die Bindung der Wolframpartikel an die Matrix verbessern. Die Abdichtung des Sinterofens und die Reinheit der Atmosphäre sind entscheidend für die Prozessstabilität und müssen regelmäßig überprüft werden, um eine Kontamination durch Sauerstoff oder Feuchtigkeit zu vermeiden.

Die Vorteile der Flüssigphasensintertechnologie liegen in ihrer hohen Effizienz und Dichte. Dadurch erfüllen Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen die hohen Leistungsanforderungen von Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt, militärischen Panzerkernen und medizinischen Strahlenschutzvorrichtungen. Allerdings stellt das Flüssigphasensintern hohe Anforderungen an die Ausrüstung (z. B. hochpräzise Temperaturregelöfen), und die Prozessparameter müssen präzise optimiert werden, um eine übermäßige oder unzureichende Flüssigphasenkonzentration zu vermeiden. Die erfolgreiche Anwendung der Flüssigphasensintertechnologie ist der Schlüssel zur Erzielung hervorragender Leistungen von Wolfram-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nickel-Eisen-Legierungen und hat ihre breite Anwendung im Hochtechnologiebereich gefördert.

### 3.2.3 Additive Fertigungstechnologie (3D-Druck)

Additive Fertigung (AM) oder 3D-Druck ist eine Methode zur direkten Herstellung komplex geformter Teile durch schichtweises Aufeinanderschichten von Materialien und hat zunehmend bei der Herstellung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen an Bedeutung gewonnen. Diese Technologie ermöglicht eine hohe Designfreiheit, reduziert Materialabfall und eignet sich für die schnelle Prototypenentwicklung von Teilen mit komplexen Geometrien. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen stellen aufgrund ihrer hohen Dichte (16,5–18,75 g/cm<sup>3</sup>) und ihres hohen Schmelzpunkts (Wolframschmelzpunkt 3410 °C) hohe Anforderungen an 3D-Druckverfahren. Durch die Optimierung der Prozessparameter hat sie jedoch erhebliches Potenzial in der Luft- und Raumfahrt, der Medizin und im Militärbereich gezeigt.

Der 3D-Druck von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen erfolgt hauptsächlich mittels selektivem Laserschmelzen (SLM) oder Elektronenstrahlschmelzen (EBM). Beim SLM wird Metallpulver mit einem Hochleistungslaser schichtweise geschmolzen, während beim EBM ein Elektronenstrahl das Pulver im Vakuum schmilzt. Beide Verfahren schichten Wolfram-, Nickel- und Eisen-Mischpulver (oder vorlegiertes Pulver) schichtweise auf und schmelzen es zu dichten Legierungsteilen. Die niedrigeren Schmelzpunkte von Nickel und Eisen (1455 °C bzw. 1538 °C) unterstützen die Bildung einer flüssigen Phase und fördern die Bindung der Wolframpartikel, ähnlich dem Mechanismus des Flüssigphasensinterns.

Die Pulveraufbereitung ist ein wichtiger Schritt beim 3D-Druck. Es werden hochreines Wolframpulver (Reinheit  $\geq 99,9\%$ , Partikelgröße 10–50 Mikrometer), Nickelpulver (Reinheit  $\geq 99,8\%$ ) und Eisenpulver (Reinheit  $\geq 99,5\%$ ) benötigt, gemischt im gewünschten Mischungsverhältnis (z. B. 90W-7Ni-3Fe), oder es wird vorlegiertes Pulver verwendet, um eine einheitliche Zusammensetzung zu gewährleisten. Das Pulver muss eine gute Fließfähigkeit (üblicherweise durch Sphäroidisierung) und eine gleichmäßige Partikelgrößenverteilung aufweisen, um die Stabilität während des Drucks zu gewährleisten.

Um die Qualität zu gewährleisten, müssen die Druckprozessparameter präzise optimiert werden. Beim SLM beträgt die Laserleistung üblicherweise 200–400 W, die Scangeschwindigkeit 500–1500 mm/s und die Schichtdicke 20–50  $\mu\text{m}$ . EBM muss in einer Vakuumumgebung mit einer Elektronenstrahlleistung von 3–6 kW betrieben werden. Durch Optimierung der Energiedichte können Risse und Poren vermieden und eine Dichte von über 98 % erreicht werden. Nach dem Drucken müssen die Teile üblicherweise wärmebehandelt werden (z. B. durch Glühen bei 800–1000 °C), um Eigenspannungen abzubauen. In Kombination mit heißisostatischem Pressen (HIP, 1200–1400 °C, 100–200 MPa) kann die Dichte weiter auf 99,5 % erhöht werden.

Der Vorteil des 3D-Drucks besteht darin, dass er komplex geformte Teile aus Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen, wie z. B. Gegengewichte für die Luft- und Raumfahrt oder Teile für medizinische Strahlenschutzvorrichtungen, direkt herstellen kann, wodurch herkömmliche Verarbeitungsschritte reduziert werden. Der hohe Schmelzpunkt und die hohe Wärmeleitfähigkeit von Wolfram (173 W/m·K)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

führen jedoch zu großen Temperaturgradienten und leichter Rissbildung; die Pulverkosten sind hoch, und die Druckanlage muss hochpräzise gesteuert werden. Nickel und Eisen können beim Schmelzen bei hohen Temperaturen verdampfen, und die Zusammensetzung muss durch Argonschutz oder vorlegiertes Pulver kontrolliert werden. Aktuell kann mit der SLM-Technologie eine Zugfestigkeit von 700–900 MPa erreicht werden, was nahe an Produkten aus der traditionellen Pulvermetallurgie liegt.

3D-gedruckte Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen eignen sich zur Herstellung von Ausgleichsblöcken für Turbinenschaufeln in der Luft- und Raumfahrt, maßgeschneiderten Strahlenschutzkomponenten im medizinischen Bereich und hochpräzisen panzerbrechenden Projektilkernen im Militärbereich. Mit der Weiterentwicklung von Druckgeräten und der Pulveraufbereitungstechnologie dürfte sich der 3D-Druck zu einer wichtigen Technologie für die Herstellung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen entwickeln, insbesondere bei der Produktion von Kleinserien und komplex geformten Teilen.

### 3.2.4 Weitere Präparationstechniken

Zur Herstellung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen kommen neben Pulvermetallurgie und additiver Fertigung auch Technologien wie mechanisches Legieren, Plasmaspritzen und Metallspritzguss zum Einsatz. Diese Verfahren bieten einzigartige Vorteile für spezifische Anwendungsszenarien (wie komplexe Formen, verschleißfeste Beschichtungen oder Hochleistungskomponenten) und gleichen die Einschränkungen traditioneller Verfahren aus.

Mechanisches Legieren (MA) ist ein Verfahren zur Herstellung von Verbundpulvern durch Hochenergie-Kugelmahlen. Durch das Hochenergie-Kugelmahlen werden Wolfram-, Nickel- und Eisenpulver plastisch verformt, gebrochen und kalt verschweißt, wodurch ein gleichmäßiges Verbundpulver entsteht und die Sinteraktivität verbessert wird. Das Verfahren verwendet eine Planetenkugelmühle mit einem Kugel-Material-Verhältnis von 10:1 bis 20:1 und einer Kugelmahlzeit von 10–20 Stunden. Es muss unter Argonschutz durchgeführt werden, um Oxidation zu vermeiden. Das resultierende Pulver wird durch kalisostatisches Pressen und Sintern zu einer dichten Legierung geformt. Mit diesem Verfahren können Wolframpartikel verfeinert (auf 1–3 Mikrometer), die Gleichmäßigkeit der Legierung und die mechanischen Eigenschaften verbessert und es eignet sich für die Herstellung hochfester Komponenten wie militärischer panzerbrechender Projektilkerne, aber der Prozess ist lang und es können leicht Verunreinigungen eindringen. Beim Plasmaspritzen werden Wolfram-, Nickel- und Eisenpulver durch eine Hochtemperatur-Plasmaflamme auf die Substratoberfläche gespritzt, um eine hochdichte Beschichtung oder ein nahezu konturnahes Bauteil zu erzeugen. Die Pulverpartikelgröße beträgt 20–50 Mikrometer, und das Spritzen erfolgt unter Argon- oder Heliumschutz. Nach dem Spritzen kann die Leistung durch Wärmebehandlung oder mechanische Bearbeitung optimiert werden. Dieses Verfahren eignet sich zur Herstellung verschleiß- oder korrosionsbeständiger Beschichtungen für Industrieformen oder hochtemperaturbeständige Teile in der Luft- und Raumfahrt. Allerdings ist die Beschichtungsdichte gering (ca. 95 %) und daher nicht für großvolumige Teile geeignet.

Beim Metallspritzgießen (MIM) werden Wolfram-, Nickel- und Eisenpulver mit organischen Bindemitteln (z. B. Polypropylen oder Wachs, 10–20 %) zu einem spritzbaren Brei vermischt und mittels

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

einer Spritzgussmaschine Rohlinge mit komplexen Formen hergestellt. Die Entbinderung erfolgt bei 400–600 °C, das Sintern in einer Wasserstoff- oder Vakuumatmosphäre bei 1400–1500 °C. MIM eignet sich für die Herstellung kleiner, komplex geformter Teile, wie z. B. Präzisionsabschirmteile für medizinische Geräte oder Gegengewichte für elektronische Geräte. Der Entbinderungsprozess ist jedoch aufwendig, und es können Spuren von Kohlenstoff verbleiben, die die Leistung beeinträchtigen.

Die Technologien werden je nach Anwendungsanforderungen und Produktionsmaßstab ausgewählt. Mechanisches Legieren eignet sich für die Hochleistungs-Kleinserienfertigung, Plasmaspritzen zur Oberflächenverfestigung und MIM für die Massenproduktion komplex geformter Teile. Zukünftige Prozessoptimierungen und Anlagenmodernisierungen (wie effizienteres Plasmaspritzen oder kostengünstiges MIM) werden die Anwendungsaussichten dieser Technologien weiter verbessern und den vielfältigen Anforderungen an Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen im Hochtechnologiebereich gerecht werden.

### 3.3 Verarbeitungstechnologie der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen sind das Schlüsselement, um sicherzustellen, dass die Endprodukte die Konstruktions- und Leistungsanforderungen erfüllen. Aufgrund ihrer hohen Dichte (16,5–18,75 g/cm<sup>3</sup>), ihrer hohen Härte (Vickershärte 250–400) und ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften erfordert der Verarbeitungsprozess spezielle Geräte und Verfahren, um die hohe Härte und die mittlere Zähigkeit zu überwinden. Gängige Verarbeitungstechnologien umfassen Zerspanungs- und Wärmebehandlungsverfahren, die eine präzise Formgebung, optimale Leistung sowie eine verbesserte Oberflächenqualität und Umweltverträglichkeit der Legierung ermöglichen. Im Folgenden werden die Anwendung von Zerspanungs- und Wärmebehandlungsverfahren bei der Verarbeitung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen und ihre wichtigsten technischen Aspekte detailliert erläutert.

#### 3.3.1 Bearbeitung

Die spanende Bearbeitung ist ein wichtiger Schritt bei der Herstellung von Endteilen aus Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Sie dient dazu, den gesinterten Grünkörper in präzise geometrische Formen zu bringen, um den hohen Präzisionsanforderungen der Luft- und Raumfahrt, des Militärs und der Medizin gerecht zu werden. Die hohe Härte und die mäßige Zähigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen erschweren die Bearbeitung. Durch die Auswahl geeigneter Werkzeuge, Bearbeitungsparameter und Prozessmethoden lässt sich jedoch eine hocheffiziente und hochpräzise Bearbeitung erreichen.

**Verarbeitungseigenschaften** : Die hohe Härte (HV 250–400) und Dichte der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung führt zu erhöhtem Werkzeugverschleiß während der Bearbeitung. Die moderate Zähigkeit (Dehnung 10–20 %) erfordert eine kontrollierte Schnittkraft, um Oberflächenrisse oder Verformungen zu vermeiden. Gängige Bearbeitungsverfahren sind Drehen, Fräsen, Bohren, Schleifen und Funkenerosion (EDM). Jedes Verfahren muss entsprechend der Form- und Präzisionsanforderungen des Bauteils ausgewählt werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Drehen und Fräsen** : Drehen und Fräsen dienen der Bearbeitung von regelmäßig geformten Teilen, wie z. B. zylindrischen Gegengewichten oder panzerbrechenden Projektilkernen. Hartmetallwerkzeuge (z. B. WC-Co) oder Werkzeuge aus kubischem Bornitrid (CBN) werden aufgrund ihrer Verschleißfestigkeit und der hohen Härte der Legierung benötigt. Die Schnittgeschwindigkeit liegt üblicherweise bei 20–50 m/min, der Vorschub bei 0,05–0,2 mm/U und die Schnitttiefe bei 0,1–1 mm. Während der Bearbeitung wird Kühlmittel (z. B. wasserbasiertes Kühlschmiermittel) benötigt, um Schnitttemperatur, Werkzeugverschleiß und thermische Schäden an der Werkstückoberfläche zu reduzieren. Hochgeschwindigkeits-CNC-Werkzeugmaschinen können die Bearbeitungsgenauigkeit verbessern.

**Bohren** : Bohren dient zum Herstellen von Löchern oder Gewindestrukturen, beispielsweise zur Befestigung von Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt. Es werden Hartmetallbohrer benötigt. Die Bohrgeschwindigkeit liegt bei 10–30 m/min und der Vorschub bei 0,02–0,1 mm/U. Tieflochbohren erfordert schrittweises Bohren und ausreichende Kühlung, um Bohrerbrüche oder raue Lochwände zu vermeiden. Nach der Bearbeitung muss die Genauigkeit des Lochdurchmessers überprüft werden, um die Konstruktionsanforderungen zu erfüllen.

**Schleifen** : Schleifen dient der hochpräzisen Oberflächenbearbeitung, beispielsweise zum Glätten von Oberflächen von medizinischen Strahlenschutzkomponenten. Diamant- oder CBN-Schleifscheiben werden aufgrund ihrer hohen Härte bevorzugt und eignen sich zum effektiven Schleifen von Legierungen. Die Schleifgeschwindigkeit beträgt 20–30 m/s, der Vorschub 0,01–0,05 mm/Stunde. Zur Regelung der Schleiftemperatur ist Kühlmittel erforderlich.

**Elektroerosives Bearbeiten (EDM)** : Für komplexe Formen oder hochpräzise Teile, wie beispielsweise winzige Abschirmteile für medizinische Geräte, ist das Elektroerosive Bearbeiten eine effektive Methode. EDM nutzt elektrische Funkenentladungen zum Materialabtrag und eignet sich für die Bearbeitung komplexer, schwer zerspanbarer Geometrien. Bei der Bearbeitung kommen Kupfer- oder Graphitelektroden zum Einsatz, als Arbeitsmedium dient Isolieröl, und die Stromstärke wird auf 5–20 A geregelt. EDM ermöglicht eine hohe Präzision (Toleranz  $\pm 0,005$  mm), die Bearbeitungsgeschwindigkeit ist jedoch gering, und das Verfahren eignet sich für die Kleinserienfertigung.

**Verarbeitungshinweise** : Die spanende Bearbeitung erfordert eine strenge Kontrolle des Werkzeugverschleißes und der Werkstückoberflächenqualität, um Mikrorisse oder Oberflächenspannungskonzentrationen zu vermeiden. Nach der Bearbeitung wird üblicherweise eine Ultraschallreinigung durchgeführt, um Kühlschmierstoffrückstände zu entfernen. Zur weiteren Verbesserung der Oberflächengüte kann Polieren eingesetzt werden. Zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit kann eine Oberflächenbeschichtung (z. B. Ni-P-Beschichtung) aufgetragen werden.

### 3.3.2 Wärmebehandlungstechnologie

Die Wärmebehandlungstechnologie ist ein wichtiger Bestandteil der WNiFe- Legierungsverarbeitung. Sie dient der Optimierung der Mikrostruktur, dem Abbau innerer Spannungen sowie der Verbesserung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der mechanischen Eigenschaften und der Umweltverträglichkeit. Die Wärmebehandlung von WNiFe-Legierungen umfasst üblicherweise Glühen, Alterungsbehandlung und Lösungsglühen. Die Auswahl des Verfahrens richtet sich nach der Legierungszusammensetzung und den Anwendungsanforderungen. Durch die Wärmebehandlung können die Zähigkeit, Zugfestigkeit (800–1000 MPa) und Dauerfestigkeit der Legierung verbessert werden, während gleichzeitig ihre hohe Dichte und Härte erhalten bleiben.

**Glühen** : Glühen ist das am häufigsten verwendete Wärmebehandlungsverfahren für Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Es dient dazu, beim Sintern oder Bearbeiten entstehende Eigenspannungen zu beseitigen und die Zähigkeit und Bearbeitbarkeit zu verbessern. Das Glühen erfolgt üblicherweise in einem Vakuum- oder Wasserstoffofen. Die Temperatur wird auf 800–1000 °C geregelt, die Haltezeit beträgt 1–2 Stunden, und die Abkühlrate wird auf 5–10 °C/min geregelt, um thermische Spannungen zu vermeiden. Nach dem Glühen kann die Dehnung der Legierung auf 15–25 % erhöht werden. Die Zugfestigkeit nimmt leicht ab, bleibt aber bei 700–900 MPa, was für Anwendungen mit hohen Zähigkeitsanforderungen, wie z. B. Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt, geeignet ist.

**Alterungsbehandlung** : Die Alterungsbehandlung dient der weiteren Optimierung der Festigkeit und Härte der Legierung, insbesondere bei Legierungen mit hohem Wolframgehalt (wie z. B. 95W-4Ni-1Fe). Die Alterungsbehandlung erfolgt bei 500–700 °C für 2–4 Stunden, üblicherweise unter Vakuum oder Schutzgas (z. B. Argon). Während des Alterungsprozesses erhöhen mikroskopische Ausscheidungsphasen (z. B. Ni-Fe-Verbindungen) in der Nickel-Eisen-Matrix die Matrixfestigkeit und erhöhen die Vickershärte der Legierung auf 350–400 HV. Diese Behandlung eignet sich für Anwendungen wie militärische panzerbrechende Kerne, die eine hohe Härte erfordern, kann aber die Zähigkeit leicht reduzieren.

**Lösungsglühen** : Das Lösungsglühen eignet sich zur Anpassung der Mikrostruktur der Legierung und zur Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Nickel-Eisen-Matrix. Die Behandlungstemperatur beträgt 1100–1200 °C. Diese Temperatur wird 1–2 Stunden gehalten, anschließend erfolgt eine schnelle Abkühlung (üblicherweise durch Wasser- oder Gasabschreckung). Durch das Lösungsglühen können ungleichmäßige Niederschläge aufgelöst und die chemische Gleichmäßigkeit der Matrix verbessert werden, wodurch sich Korrosionsbeständigkeit und Ermüdungsfestigkeit verbessern. Das Lösungsglühen wird üblicherweise mit einer Alterung bei niedrigen Temperaturen (500–600 °C) kombiniert, um die Festigkeit wiederherzustellen. Das Lösungsglühen eignet sich für Legierungsteile im Schiffsbau oder in der Medizin, die eine hohe Korrosionsbeständigkeit erfordern.

**Wärmebehandlungsanlagen und Prozesskontrolle** : Die Wärmebehandlung erfordert den Einsatz eines hochpräzisen Vakuumofens oder eines Wasserstoffatmosphärenofens, um die Reinheit der Atmosphäre (> 99,99 %) sicherzustellen und Oxidation zu verhindern. Die Temperaturregelgenauigkeit muss  $\pm 5$  °C erreichen, und der Abkühlprozess muss gleichmäßig erfolgen, um Mikrorisse durch thermische Spannung zu vermeiden. Nach der Wärmebehandlung muss die Mikrostruktur mittels metallografischer Mikroskopie oder Röntgenbeugung (XRD) analysiert werden, um die Gleichmäßigkeit der Wolframpartikel und der Nickel-Eisen-Matrix sicherzustellen. Mechanische Eigenschaftsprüfungen (wie Zugfestigkeitsprüfungen oder Härteprüfungen) dienen zur Überprüfung des

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmebehandlungseffekts.

**Anwendung und Optimierung** : Die Auswahl des Wärmebehandlungsverfahrens und die Optimierung der Parameter sollten auf den spezifischen Anwendungsanforderungen basieren. Beispielsweise werden Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt bevorzugt gegläht, um die Zähigkeit zu verbessern, während Kerne militärischer Panzerungsgeschosse zur Erhöhung der Härte gealtert werden. Die Wärmebehandlung kann auch mit mechanischer Bearbeitung kombiniert werden, z. B. durch Glühen zur Verbesserung der Bearbeitbarkeit und anschließendes Finishing und Altern zur Leistungsoptimierung. Der sinnvolle Einsatz von Wärmebehandlungstechnologie kann die Gesamtleistung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen deutlich verbessern und die strengen Anforderungen von Hightech-Bereichen erfüllen.

### 3.3.3 Oberflächenbehandlung und Beschichtungstechnik

Oberflächenbehandlung und Beschichtungstechnologie sind wichtige Bestandteile der Verarbeitung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Sie zielen darauf ab, die Korrosionsbeständigkeit, Verschleißfestigkeit, Oberflächenbeschaffenheit und Umweltverträglichkeit der Legierung zu verbessern. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen finden aufgrund ihrer hohen Dichte ( $16,5-18,75 \text{ g/cm}^3$ ), hohen Härte (Vickershärte 250–400) und hervorragenden mechanischen Eigenschaften breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, im Militärbereich und in der Medizin. Ihre Oberfläche kann jedoch aufgrund von Verarbeitungs- oder Umweltfaktoren Korrosion, Verschleiß oder Oxidation ausgesetzt sein, daher ist eine weitere Optimierung der Leistung durch Oberflächenbehandlung und Beschichtungstechnologie erforderlich. Im Folgenden werden die Oberflächenbehandlung und Beschichtungstechnologie von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sowie ihre wichtigsten Prozesspunkte detailliert erläutert.

#### Oberflächenbehandlungstechnologie

Die Oberflächenbehandlung umfasst hauptsächlich Polieren, Sandstrahlen und chemische Reinigungsverfahren, um die Oberflächenqualität der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung zu verbessern, Verarbeitungsfehler zu beseitigen und sie für die anschließende Beschichtung oder Anwendung vorzubereiten. Diese Technologien können die Oberflächenbeschaffenheit und Korrosionsbeständigkeit der Legierung deutlich verbessern, um den Anforderungen an hohe Präzision und raue Umgebungsbedingungen gerecht zu werden.

**Polieren** : Polieren ist eine gängige Methode zur Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Dadurch lässt sich eine geringe Oberflächenrauigkeit ( $R_a 0,1-0,2 \mu\text{m}$ ) erzielen, die sich für medizinische Strahlenschutzvorrichtungen oder Präzisionsteile in der Luft- und Raumfahrt eignet. Beim mechanischen Polieren wird Diamantpaste oder Aluminiumoxid-Polierflüssigkeit in Kombination mit einer schnell rotierenden Polierscheibe (1000–2000 U/min) verwendet. Die Polierzeit beträgt 10–30 Minuten. Elektrochemisches Polieren wird ebenfalls häufig für komplex geformte Teile verwendet. Dabei wird ein saurer Elektrolyt (z. B. ein Schwefelsäure-Phosphorsäure-Gemisch) mit einer Stromdichte von  $5-10 \text{ A/dm}^2$  und einer Bearbeitungszeit von 5–15

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Minuten verwendet. Polieren verbessert nicht nur die Oberflächenbeschaffenheit, sondern reduziert auch Mikrorisse und Spannungskonzentrationen und verbessert die Korrosions- und Ermüdungsbeständigkeit.

**Sandstrahlen** : Beim Sandstrahlen werden Strahlmittel (z. B. Aluminiumoxid oder Glasperlen mit einer Partikelgröße von 50–150 µm) mit Hochdruckluft auf die Legierungsoberfläche gesprüht. Dadurch werden Oxidschichten, Grate und Bearbeitungsspuren entfernt und eine gleichmäßig matte Oberfläche (Ra 1,6–3,2 µm) erzeugt. Der Strahldruck liegt bei 0,3–0,6 MPa, der Sprühabstand bei 100–150 mm. Sandstrahlen kann die Oberflächenrauheit verbessern und die Haftung nachfolgender Beschichtungen verbessern. Es eignet sich für militärische Panzerkerne oder industrielle Verschleißteile. Die Strahlzeit (üblicherweise 1–3 Minuten) sollte sorgfältig kontrolliert werden, um übermäßige Rauheit oder Oberflächenschäden zu vermeiden.

**Chemische Reinigung** : Chemische Reinigung dient der Entfernung von Oberflächenöl, Oxiden oder Bearbeitungsrückständen und sorgt so für eine saubere Oberfläche. Gängige Reinigungslösungen sind verdünnte Säuren (z. B. 5–10 %ige Salzsäure oder Salpetersäurelösung) oder alkalische Lösungen (z. B. Natronlauge) bei einer Reinigungstemperatur von 40–60 °C und einer Einwirkzeit von 5–10 Minuten. Nach der Reinigung mit deionisiertem Wasser abspülen und im Vakuum oder unter Inertgas (z. B. Stickstoff) trocknen, um eine sekundäre Oxidation zu verhindern. Chemische Reinigung wird häufig als Vorbehandlungsschritt vor dem Beschichten eingesetzt, um eine gute Haftung zwischen Beschichtung und Substrat zu gewährleisten.

### **Beschichtungstechnologie**

Beschichtungstechnologie verbessert die Korrosionsbeständigkeit, Verschleißfestigkeit und thermische Stabilität von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen durch das Aufbringen funktionaler Beschichtungen auf deren Oberfläche zusätzlich. Gängige Beschichtungsverfahren sind Galvanisieren, physikalische Gasphasenabscheidung (PVD), chemische Gasphasenabscheidung (CVD) und thermisches Spritzen. Jede Technologie bietet unterschiedliche Leistungsverbesserungen für spezifische Anwendungsanforderungen.

**Galvanisieren** : Galvanisieren wird üblicherweise verwendet, um Nickel-Phosphor- (Ni-P) oder Nickel-Chrom- (Ni-Cr) Beschichtungen aufzutragen und so die Korrosionsbeständigkeit und Oberflächenhärte zu verbessern. Ni-P-Beschichtungen (mit 8–12 % Phosphor) werden in einem stromlosen Verfahren mit einer Badtemperatur von 80–90 °C, einem pH-Wert von 4,5–5,5, einer Abscheidungszeit von 1–2 Stunden und einer Schichtdicke von 10–50 Mikrometern aufgetragen.

Ni-P-Beschichtungen können eine Härte von 500–600 HV erreichen und weisen eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit auf, sodass sie sich für Gegengewichte im Schiffsbau eignen. Ni-Cr-Beschichtungen werden in einem Galvanisierungsverfahren mit einer Stromdichte von 20–40 A/dm<sup>2</sup> und einer Schichtdicke von 5–20 Mikrometern aufgetragen und eignen sich daher für Industrieteile, die eine hohe Verschleißfestigkeit erfordern. Beim Galvanisieren muss sichergestellt werden, dass die Substratoberfläche sauber ist, um ein Abblättern der Beschichtung zu vermeiden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) :** PVD scheidet durch Verdampfen oder Sputtern von Metall-/Keramikmaterialien in einer Vakuumumgebung dünne Filme (wie beispielsweise TiN, CrN oder DLC) auf der Legierungsoberfläche ab. Die Schichtdicke beträgt 1–5 Mikrometer. Der PVD-Prozess wird bei 300–500 °C, einem Vakuum von  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  Pa und einer Abscheidungszeit von 1–3 Stunden durchgeführt. Die Härte der TiN-Beschichtung kann 2000–2500 HV erreichen, was die Verschleißfestigkeit deutlich verbessert und sich für militärische panzerbrechende Projektilkerne oder Schneidwerkzeugoberflächen eignet. Die DLC-Beschichtung (diamantähnlicher Kohlenstoff) hat einen niedrigen Reibungskoeffizienten (0,1–0,2) und eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit und eignet sich für Gleitteile in medizinischen Geräten. PVD-Beschichtungen haben eine starke Haftung, die Ausrüstungskosten sind jedoch relativ hoch und sie eignen sich nicht für hochpräzise Anwendungen.

**Chemische Gasphasenabscheidung (CVD) :** Bei der CVD wird durch eine chemische Reaktion eine keramische Beschichtung (z. B. WC oder  $Al_2O_3$ ) mit einer Schichtdicke von 5–10 Mikrometern auf der Legierungsoberfläche abgeschieden. Die Prozesstemperatur beträgt 800–1000 °C und muss in einer Atmosphäre durchgeführt werden, die einen Kohlenstoff- oder Aluminiumvorläufer enthält. Die Abscheidungszeit beträgt 2–4 Stunden. CVD-Beschichtungen weisen eine extrem hohe Härte (WC-Beschichtungen können 1500–2000 HV erreichen) und hohe Temperaturbeständigkeit auf, wodurch sie sich für Hochtemperaturkomponenten in der Luft- und Raumfahrt oder für Industrieformen eignen. Hochtemperaturprozesse können jedoch die Mikrostruktur der Legierungsmatrix beeinträchtigen, und zur Leistungsoptimierung ist eine anschließende Wärmebehandlung (z. B. Glühen) erforderlich.

**Thermisches Spritzen :** Beim thermischen Spritzen (z. B. Plasmaspritzen) wird Keramik- oder Metallpulver (z. B. WC-Co- oder Ni-basierte Legierungen) durch einen Hochtemperaturflammenstrom auf die Legierungsoberfläche gespritzt, wodurch eine 50–200 µm dicke Beschichtung entsteht. Das Spritzen erfolgt unter Argon- oder Heliumschutz. Thermische Spritzbeschichtungen weisen eine ausgezeichnete Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit auf und eignen sich für industrielle Verschleißteile oder Gegengewichte in Meeresumgebungen. Allerdings ist die Beschichtungsdichte gering (ca. 95 %) und kann eine nachträgliche Bearbeitung oder Wärmebehandlung erfordern.

### Prozesskontrolle und Anwendung

Die Implementierung von Oberflächenbehandlungs- und Beschichtungstechnologien erfordert eine strenge Kontrolle der Prozessparameter, um die Haftfestigkeit und Leistungsstabilität von Beschichtung und Substrat zu gewährleisten. Vor der Oberflächenbehandlung müssen Öl und Oxide durch Ultraschall- oder chemische Reinigung entfernt werden. Nach der Beschichtung werden Haftprüfungen (z. B. Kratztests) und Härteprüfungen (z. B. mit Vickers-Härteprüfgeräten) durchgeführt, um die Qualität zu überprüfen. Die Beschichtungsdicke muss entsprechend den Anwendungsanforderungen optimiert werden. Zu dicke Schichten können zum Abblättern führen, zu dünne Schichten bieten möglicherweise keinen ausreichenden Schutz. Diese Technologien haben die Leistungsfähigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen deutlich verbessert. Beispielsweise verbessern galvanische Ni-P-Beschichtungen die Korrosionsbeständigkeit von Gegengewichten im Schiffsbau; PVD- TiN -Beschichtungen verbessern die Verschleißfestigkeit von Kernen panzerbrechender militärischer Geschosse; CVD-WC-Beschichtungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bieten thermischen Schutz für Hochtemperaturkomponenten in der Luft- und Raumfahrt. Durch die gezielte Auswahl und Optimierung von Oberflächenbehandlungs- und Beschichtungstechnologien erfüllen Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen vielfältige und leistungsstarke Anwendungsanforderungen.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Kapitel 4 Qualitätskontrolle und Inspektion von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen

### 4.1 Zusammensetzungsanalyse der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sind wichtige Schritte, um sicherzustellen, dass ihre Leistung den strengen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt, des Militärs, der Medizin und anderer Bereiche entspricht. Die Zusammensetzungsanalyse ist das Herzstück der Qualitätskontrolle. Ziel ist es zu überprüfen, ob die chemische Zusammensetzung und die Mikrostruktur der Legierung den Designstandards entsprechen. Die Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen (wie Dichte, Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit) hängen direkt von den genauen Anteilen von Wolfram (85–95 %), Nickel (5–10 %) und Eisen (2–5 %) sowie der Gleichmäßigkeit ihrer Mikrostruktur ab. Daher sind die Prüfung der chemischen Zusammensetzung und die Analyse der Mikrostruktur unverzichtbare Schritte, um die Stabilität und Zuverlässigkeit der Legierung zu gewährleisten. Im Folgenden werden die Prüfmethoden für die chemische Zusammensetzung und die Techniken zur Mikrostrukturanalyse im Detail erläutert.

#### 4.1.1 Methode zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung

Mithilfe der chemischen Zusammensetzungsprüfung wird der Gehalt an Wolfram, Nickel, Eisen und anderen Spurenelementen in Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen bestimmt, um sicherzustellen, dass diese der Zielformel (z. B. 90W-7Ni-3Fe) und den entsprechenden Normen (z. B. ASTM B777) entsprechen. Die Nachweismethode muss eine hohe Genauigkeit und Empfindlichkeit aufweisen, um die Hauptbestandteile und Spurenverunreinigungen (z. B. Sauerstoff, Kohlenstoff und Schwefel) zu identifizieren. Zu den gängigen Nachweismethoden für die chemische Zusammensetzung gehören:

#### Röntgenfluoreszenzspektroskopie ( XRF )

Die Röntgenfluoreszenzspektroskopie ist ein weit verbreitetes zerstörungsfreies Analyseverfahren, das auf der Wechselwirkung zwischen Röntgenstrahlen und Materie basiert. Wird eine Probe einer Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung mit energiereicher Röntgenstrahlung bestrahlt, absorbieren die Atome an der Probenoberfläche die Röntgenenergie, wodurch die inneren Elektronen angeregt werden und in energiereiche Bahnen springen. Die Atome befinden sich dann in einem instabilen angeregten Zustand. Die äußeren Elektronen füllen rasch die von den inneren Elektronen hinterlassenen Lücken. Dabei geben die Atome Energie in Form charakteristischer Fluoreszenzstrahlung (sekundäre Röntgenstrahlung) ab. Da jedes Element seine eigene, einzigartige Atomstruktur besitzt, hat die emittierte charakteristische Fluoreszenzstrahlung eine spezifische Energie und Wellenlänge. Durch Messung der Energie und Intensität dieser Fluoreszenzstrahlung lassen sich Art und Gehalt der in der Legierung vorhandenen Elemente bestimmen.

Die XRF-Technologie bietet erhebliche Vorteile bei der Analyse von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Sie kann die Hauptelemente wie Wolfram, Nickel und Eisen in der Legierung schnell nachweisen. Eine Analyse dauert in der Regel nur 1–5 Minuten und eignet sich daher hervorragend für

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Online-Qualitätskontrolle im Produktionsprozess. Sie liefert zeitnahe Informationen zur Produktzusammensetzung und erleichtert dem Produktionspersonal die Anpassung der Prozessparameter. Die XRF-Detektionsgenauigkeit erreicht 0,01 %, was für die meisten industriellen Anwendungen ausreicht. Beispielsweise kann die XRF bei der Herstellung konventioneller mechanischer Teile aus Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen präzise feststellen, ob der Gehalt der Hauptelemente den Standards entspricht, und so die Produktstabilität gewährleisten .

Für die Probenvorbereitung erfordert die Röntgenfluoreszenzanalyse eine gewisse Ebenheit der Probenoberfläche und eine Politur der Probe auf eine Oberflächenrauheit von  $Ra < 1,6 \mu m$ . Eine unebene Oberfläche kann die Streuung und Absorption von Röntgenstrahlen erschweren und somit die Genauigkeit der Messergebnisse beeinträchtigen. Durch Feinpolitur wird sichergestellt, dass die Röntgenstrahlen gleichmäßig auf die Probenoberfläche einwirken, sodass die detektierte Fluoreszenzstrahlung die Elementzusammensetzung der Probe genauer wiedergibt.

RFA-Geräte gibt es in verschiedenen Ausführungen, darunter Hand- und Tischspektrometer. Handspektrometer sind leicht zu transportieren und ermöglichen eine schnelle Probenanalyse vor Ort. Sie eignen sich für die Voranalyse großer Werkstücke oder Proben, deren Transport ins Labor umständlich ist. Tischspektrometer haben in der Regel eine höhere Auflösung und Stabilität, liefern genauere Analyseergebnisse und eignen sich für die eingehende Untersuchung und Qualitätskontrolle von Proben im Labor. Unabhängig vom Gerätetyp ist die Bedienung relativ einfach und kann von Personal mit entsprechender Grundausbildung bedient werden, was die breite Anwendung der RFA-Technologie weiter fördert.

Die XRF-Technologie ist jedoch nicht perfekt. Sie weist eine geringe Empfindlichkeit beim Nachweis von Spurenelementen ( wie Sauerstoff oder Kohlenstoff) auf. Dies liegt daran, dass die charakteristische Röntgenenergie leichter Elemente wie Sauerstoff und Kohlenstoff gering ist und daher während des Nachweisprozesses leicht durch Hintergrundrauschen gestört wird. Zudem ist die von ihnen erzeugte Fluoreszenzintensität relativ schwach, was eine genaue Bestimmung ihres Gehalts erschwert. Bei der Analyse hochreiner Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen genügt die XRF-Technologie möglicherweise nicht den Anforderungen, wenn es um die genaue Bestimmung extrem geringer Mengen an Sauerstoff- und Kohlenstoffverunreinigungen geht . In diesem Fall sind andere, empfindlichere Analysemethoden erforderlich.

### **Atomemissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP - AES)**

Die Atomemissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP -AES) ist ein analytisches Verfahren, das auf plasmaangeregten Atomemissionsspektren zur Bestimmung des Elementgehalts basiert. Bei der Analyse von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen muss die Probe zunächst vorbehandelt werden, d. h. die Legierungsprobe wird in einer Säurelösung gelöst . Die üblicherweise verwendete Säurelösung ist eine Mischung aus Salpetersäure oder Salzsäure. Ziel dieses Schrittes ist es, die Metallelemente der Legierung in Ionen umzuwandeln, damit sie später im Plasma angeregt werden können. Nach der Lösungsbehandlung wird die Probenlösung über das Injektionssystem in das induktiv

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gekoppelte Plasma eingeführt. Induktiv gekoppeltes Plasma wird erzeugt, indem hochfrequente elektrische Energie über eine Induktivität (Induktionsspule) an den Plasmabrenner gekoppelt wird. Es sieht aus wie eine Flamme und ist hochtemperiert (die Flammentemperatur kann 6000–8000 K erreichen). Nach Eintritt in das Plasma durchläuft die Probenlösung rasch Prozesse wie Verdampfung, Dissoziation, Atomisierung und Ionisierung. Da die Atome verschiedener Elemente über unterschiedliche Energieniveaustrukturen verfügen, springen die äußeren Elektronen der Atome bei der Hochtemperaturanregung des Plasmas in Bahnen mit hohem Energieniveau. Wenn diese Elektronen von einem hohen Energieniveau auf ein niedriges Energieniveau zurückkehren, emittieren sie Spektren mit ihren eigenen charakteristischen Wellenlängen.

ICP-AES reagiert hochempfindlich auf die Hauptelemente (Wolfram, Nickel, Eisen) und Spurenverunreinigungen (wie Schwefel und Phosphor) in Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen und hat eine Nachweisgrenze von bis zu ppm (parts per million). Dadurch lassen sich auch extrem geringe Spuren von Verunreinigungen in der Legierung nachweisen, was für die Untersuchung der Auswirkungen von Spurenverunreinigungen auf die Legierungseigenschaften von großer Bedeutung ist. Bei der Untersuchung der Auswirkungen von Schwefel- und Phosphorverunreinigungen auf die Korrosionsbeständigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen kann ICP-AES den ppm-Gehalt von Schwefel und Phosphor in der Legierung genau bestimmen und so eine Datengrundlage für die weitere Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Verunreinigungen und Korrosionsbeständigkeit liefern.

Die Probenvorbereitung mittels ICP-AES ist jedoch relativ kompliziert und zeitaufwendig. Die Legierung muss zu Pulver gemahlen werden, um die Kontaktfläche zwischen Probe und Säurelösung zu vergrößern und die Auflösungsreaktion zu fördern. Anschließend wird die Pulverprobe in der Säurelösung aufgelöst. Dieser Vorgang kann eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen, um sicherzustellen, dass sich die Probe vollständig auflöst. Die gesamte Probenvorbereitung ist in der Regel zeit- und arbeitsintensiv. Eine ICP-AES-Analyse dauert etwa 30–60 Minuten und ist damit weniger effizient als die schnelle Analyse per Röntgenfluoreszenz (XRF). Aufgrund der höheren Empfindlichkeit beim Nachweis von Spurenverunreinigungen ist ICP-AES jedoch nach wie vor eine unverzichtbare Analysemethode in der Laborforschung mit hohen Anforderungen an die Legierungseigenschaften und die Qualitätskontrolle von High-End -Produkten.

### **Glimmentladungs-Massenspektrometrie (GD - MS)**

Die Glimmentladungs-Massenspektrometrie (GD -MS) ist ein hochmodernes Analyseverfahren, das sich für die genaue Analyse hochreiner Materialien eignet, insbesondere zur Bestimmung der Zusammensetzung hochreiner Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen (wie z. B. 99,99 % reines Wolfram für medizinische Zwecke). Ihr Funktionsprinzip beruht auf dem Phänomen der Glimmentladung. Niederdruck-Argongas wird zwischen zwei Elektroden gefüllt und durch Anlegen einer Hochspannung ionisiert, wodurch ein Glimmplasma entsteht. Bei diesem Vorgang werden die Atome an der Oberfläche der zu analysierenden Probe der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung, die als Kathode dient, durch Argonionen im Plasma herausgesputtert und lösen sich von der Probenoberfläche in den Plasmabereich. Die zerstäubten Probenatome werden im Plasma weiter ionisiert und bilden positive Ionen. Diese

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

positiven Ionen werden anschließend in das Massenspektrometer eingeleitet und entsprechend ihrem Masse-Ladungs-Verhältnis ( $m/z$ ) der verschiedenen Ionen getrennt und detektiert. Da Atome verschiedener Elemente unterschiedliche Massen besitzen, entstehen an unterschiedlichen Stellen im Massenspektrometer Signalspitzen. Durch die Analyse dieser Signalspitzen lassen sich nicht nur die in der Legierung vorhandenen Elementarten, sondern auch deren Gehalt, einschließlich Haupt- und Spurenelemente, mit einer Nachweisgrenze von bis zu ppb (parts per billion) genau bestimmen.

Zur Probenvorbereitung erfordert GD-MS die Vorbereitung der Probe in Form eines flachen Blocks. Dadurch wird sichergestellt, dass die Probenoberfläche während der Glimmentladung gleichmäßig mit Argonionen besprüht wird und die Analyseergebnisse repräsentativer sind. Die Analysedauer beträgt in der Regel 10–20 Minuten. Obwohl sie länger als die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) ist, ist diese Analysedauer angesichts der hohen Empfindlichkeit der Methode zur Spurenelementdetektion und ihrer Bedeutung für die Analyse hochreiner Materialien akzeptabel.

GD-MS-Geräte sind relativ teuer, hauptsächlich aufgrund ihrer technischen Komplexität und der hohen Präzisionsanforderungen an Schlüsselkomponenten wie hochauflösende Massenspektrometer. Aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit und der Fähigkeit, mehrere Elemente gleichzeitig zu analysieren, werden sie jedoch häufig in einigen High-End-Anwendungsbereichen eingesetzt, die eine extrem hohe Legierungsreinheit erfordern, wie beispielsweise in der Halbleiterherstellung, der Luft- und Raumfahrt und der Medizinindustrie. In der Halbleiterherstellung muss die verwendete Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung eine extrem hohe Reinheit aufweisen, um Verunreinigungen zu vermeiden, die die Leistung der Halbleiterbauelemente beeinträchtigen. GD-MS kann Verunreinigungselemente in der Legierung im ppb-Bereich genau erkennen, um sicherzustellen, dass die Qualität des Materials den strengen Standards der Halbleiterherstellung entspricht.

### **Chemische Analyse (Nassanalyse)**

Die chemische Analyse (Nassanalyse) ist ein klassisches Analyseverfahren zur Trennung und quantitativen Analyse von Elementen in Legierungen durch chemische Reaktionen. Bei der Analyse von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen wird häufig die gravimetrische Methode zur Bestimmung des Wolframgehalts und die Titrationsmethode zur Ermittlung des Nickel- und Eisengehalts verwendet. Bei der gravimetrischen Bestimmung des Wolframgehalts wird die Legierungsprobe beispielsweise zunächst einer Reihe chemischer Reaktionen unterzogen, um Wolfram in Form einer bestimmten Verbindung auszufällen. Anschließend wird durch Filtern, Waschen, Trocknen und Wiegen die Masse des Niederschlags genau gemessen und der Wolframgehalt in der Legierung anhand der chemischen Reaktionsgleichung und der zugehörigen stöchiometrischen Beziehungen berechnet. Zur Bestimmung des Nickel- und Eisengehalts verwendet die Titrationsmethode eine Standardlösung bekannter Konzentration, die chemisch mit den Nickel- und Eisenionen in der Probenlösung reagiert. Der Nickel- und Eisengehalt wird anhand des Volumens der verbrauchten Standardlösung berechnet, indem der Titrationsendpunkt beurteilt wird.

Die chemische Analyse ist hochpräzise, und der Fehler liegt in der Regel unter 0,1 %. Daher ist

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

sie besonders in Situationen von großem Nutzen, in denen die Genauigkeit des Hauptbestandteilgehalts extrem hoch ist, beispielsweise bei der Kalibrierung von Standardproben oder bei kontroversen Nachweisen. Bei der Formulierung neuer Standardproben aus Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen muss der Gehalt der Hauptelemente äußerst genau bestimmt werden. Die chemische Analyseverfahren liefert zuverlässige Daten, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Standardproben sicherzustellen .

Chemische Analyseverfahren sind jedoch komplex und erfordern von professionellen Chemikern fundierte experimentelle Fähigkeiten und umfassende Erfahrung. Der gesamte Analyseprozess umfasst mehrere chemische Reaktionsschritte und eine strenge Kontrolle der Reaktionsbedingungen. Von der Probenvorbehandlung bis zur Berechnung des Endergebnisses muss jeder Schritt sorgfältig durchgeführt werden, da sich sonst leicht Fehler einschleichen können. Außerdem ist diese Methode zeitaufwändig, und eine Analyse dauert oft mehrere Stunden. Denn während des Reaktionsprozesses muss ausreichend Zeit für den vollständigen Ablauf der chemischen Reaktion eingeräumt werden, um genaue Analyseergebnisse zu gewährleisten. So dauern beispielsweise bei der Bestimmung des Wolframgehalts nach Gewicht die Schritte Niederschlagsbildung, Waschen und Trocknen lange . Beim Nachweis von Spurenverunreinigungen unterliegen chemische Analyseverfahren allein gewissen Einschränkungen. Aufgrund des extrem geringen Spurenverunreinigungsgehalts in der Legierung sind deren chemische Reaktionen möglicherweise nicht offensichtlich und lassen sich mit herkömmlichen chemischen Analyseverfahren nur schwer genau nachweisen. Um die Effizienz und Genauigkeit des Spurenverunreinigungsnachweises zu verbessern, ist es daher in der Praxis meist notwendig, andere, empfindlichere Methoden wie ICP-AES zu kombinieren. Zunächst werden die Spurenverunreinigungen mittels ICP-AES vorab nachgewiesen und quantitativ analysiert. Anschließend werden die Hauptbestandteile mithilfe chemischer Analyseverfahren präzise bestimmt, um die Zusammensetzung der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung vollständig und präzise zu verstehen.

**Wichtige Punkte der Prozesskontrolle :** Bei der Prüfung der chemischen Zusammensetzung müssen geeignete Methoden entsprechend den Anwendungsanforderungen ausgewählt werden. Beispielsweise erfordern Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt einen Wolframgehalt von  $\pm 0,5\%$ , der durch XRF erreicht werden kann. Medizinische Strahlenschutzteile erfordern eine strenge Kontrolle auf Verunreinigungen, wofür ICP-AES oder GD-MS empfohlen wird. Stellen Sie vor der Prüfung sicher, dass die Probenoberfläche sauber ist, um Verunreinigungen zu vermeiden, die die Ergebnisse beeinträchtigen. Die Prüfergebnisse sollten mit der Zielformel verglichen werden. Bei einer Abweichung von mehr als  $\pm 0,2\%$  müssen die Rohstoffe oder Prozessparameter angepasst werden.

#### 4.1.2 Mikrostrukturanalyse

Die Mikrostrukturanalyse dient der Bewertung der inneren Organisation, Phasenverteilung und Defekte von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen, die sich direkt auf ihre mechanischen Eigenschaften (wie Zugfestigkeit 800–1000 MPa), Korrosionsbeständigkeit und Dichte ( $> 99\%$ ) auswirken. Die Mikrostruktur von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen besteht üblicherweise aus Wolframpartikeln und Nickel-Eisen-Matrix sowie deren Gleichmäßigkeit, Porosität und Korngrenzeigenschaften müssen durch eine Reihe analytischer Techniken überprüft werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Metallografische Mikroskopanalyse:** Das metallografische Mikroskop dient zur Untersuchung der Mikrostruktur von Legierungen. Die Probe muss geschnitten, poliert ( $Ra < 0,1 \mu m$ ) und mit chemischen Ätzmitteln (z. B. einer Salpetersäure-Ethanol-Lösung) geätzt werden, um die Mikrostruktur freizulegen. Die Analyse kann Größe und Form der Wolframpartikel (meist nahezu kugelförmig oder polygonal) sowie die Gleichmäßigkeit der Verteilung der Nickel-Eisen-Matrix bestimmen. Die 100- bis 1000-fache Vergrößerung ermöglicht die Erkennung von Defekten wie Poren, Einschlüssen oder Korngrenzenrissen. Beispielsweise kann eine Porosität  $> 1 \%$  die Dichte reduzieren und eine Optimierung des Sinterprozesses erforderlich machen. Die metallografische Analyse ist einfach durchzuführen und eignet sich für eine schnelle Erkennung während der Produktion.

**Rasterelektronenmikroskopie (REM) und energiedispersive Spektroskopie (EDS):** REM liefert hochauflösende Mikroskopbilder (bis zu 10.000-fache Vergrößerung) zur detaillierten Beobachtung der Grenzflächenbindung zwischen Wolframpartikeln und der Nickel-Eisen-Matrix, der Partikelverteilung und mikroskopischer Defekte. In Kombination mit EDS kann eine lokale chemische Zusammensetzungsanalyse durchgeführt werden, um die Gleichmäßigkeit der Verteilung von Wolfram, Nickel und Eisen und die Anreicherung von Verunreinigungselementen (wie Sauerstoff oder Kohlenstoff) zu ermitteln. Die REM-EDS-Analyse dauert 30–60 Minuten und die Probe muss poliert und leitfähig behandelt werden (z. B. durch Kohlenstoffbeschichtung). Mit dieser Methode können Zusammensetzungsänderungen oder Einschlussprobleme wie eine ungleichmäßige Verteilung der Nickel-Eisen-Matrix identifiziert werden, die zu einer verringerten Zähigkeit führen können.

**Röntgenbeugung (XRD):** XRD bestimmt die Kristallstruktur, die Phasenzusammensetzung und die Korngröße durch Analyse des Röntgenbeugungsmusters der Probe. In Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen kann XRD die kubisch-raumzentrierte (BCC) Struktur von Wolfram und die kubisch-flächenzentrierte (FCC) Struktur der Nickel-Eisen-Matrix bestätigen und das Vorhandensein schädlicher Phasen (wie Oxide oder Carbide) nachweisen. Die Analyse dauert 1–2 Stunden, und die Probe muss plangeschliffen werden. XRD kann verwendet werden, um die Auswirkungen von Wärmebehandlung oder Sinterprozessen auf die Mikrostruktur zu bewerten, beispielsweise kann Kornwachstum die Festigkeit verringern.

**Transmissionselektronenmikroskopie (TEM):** TEM liefert mikrostrukturelle Informationen mit einer Auflösung im Subnanometerbereich zur Analyse der Grenzflächenstruktur, Versetzungen und Ausscheidungen zwischen Wolframpartikeln und der Nickel-Eisen-Matrix. TEM-Proben müssen durch Ionenverdünnung hergestellt werden, mit einer Dicke von  $< 100 \text{ nm}$  und einer Analysezeit von 2–4 Stunden. TEM eignet sich zur Untersuchung der Auswirkungen von Spurenausscheidungen (z. B. Ni-Fe-Verbindungen) auf die Leistung, insbesondere bei Hochleistungsanwendungen (z. B. militärischen panzerbrechenden Kernen). Nachteilig ist die aufwändige und kostenintensive Probenvorbereitung.

**Analysepunkte und Anwendungen:** Die Mikrostrukturanalyse erfordert eine Kombination mehrerer Methoden, um die Qualität der Legierung umfassend zu bewerten. Beispielsweise werden metallografische Mikroskopie und SEM eingesetzt, um Porosität und Partikelverteilung schnell zu erkennen, während XRD und TEM zur detaillierten Analyse der Phasenstruktur und der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Grenzflächeneigenschaften eingesetzt werden. Die Analyseergebnisse sollten die Wolframpartikelgröße (10–50  $\mu\text{m}$ ), die Matrixgleichmäßigkeit (Abweichung  $< 5\%$ ) und die Porosität ( $< 1\%$ ) bestätigen. Bei Defekten (wie Porosität  $> 1\%$  oder Einschlüssen) ist eine Optimierung der Rohstoffreinheit oder der Sinterparameter (z. B. Erhöhung der Sintertemperatur auf 1450–1550  $^{\circ}\text{C}$ ) erforderlich. Die Mikrostrukturanalyse stellt sicher, dass Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen die hohen Leistungsanforderungen von Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt, medizinischen Abschirmteilen usw. erfüllen.

## 4.2 Leistungstest der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

Leistungsprüfungen sind ein wichtiger Bestandteil der Qualitätskontrolle von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Sie dienen dazu, festzustellen, ob diese den hohen Leistungsanforderungen der Luft- und Raumfahrt, des Militärs, der Medizin und anderer Bereiche gerecht werden. Zu den Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen gehören mechanische Eigenschaften (wie Festigkeit und Zähigkeit), thermische Eigenschaften (wie Wärmeausdehnungskoeffizient und Wärmeleitfähigkeit) und elektrische Eigenschaften (wie elektrische Leitfähigkeit und spezifischer Widerstand). Diese Eigenschaften wirken sich direkt auf die Leistung der Legierung unter hoher Belastung, hohen Temperaturen oder elektromagnetischen Einflüssen aus. Durch wissenschaftliche und strenge Prüfmethode können die Zuverlässigkeit, Konsistenz und Einhaltung von Konstruktionsnormen (wie ASTM B777) der Legierung sichergestellt werden. Im Folgenden werden die Methoden und wichtigsten Punkte der mechanischen, thermischen und elektrischen Leistungsprüfung detailliert erläutert.

### 4.2.1 Prüfung der mechanischen Eigenschaften

Mechanische Eigenschaftsprüfungen dienen der Bewertung der Festigkeit, Zähigkeit, Härte und Verschleißfestigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen, um deren Leistungsfähigkeit in hochbelasteten Umgebungen sicherzustellen. Typische Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen (wie 90W-7Ni-3Fe) haben eine Zugfestigkeit von 800–1000 MPa, eine Dehnung von 10–20 % und eine Vickershärte von 250–400 HV. Die folgenden Prüfmethode werden häufig für mechanische Eigenschaften verwendet:

**Zugversuch** : Zugversuche dienen der Messung der Zugfestigkeit, Streckgrenze und Dehnung von Legierungen nach Normen wie ASTM E8. Die Prüfproben werden zu Standard-Zugproben (z. B. zylindrisch, Größe  $\phi 5\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ ) verarbeitet und mit einer Universalprüfmaschine bei einer Zuggeschwindigkeit von 0,5–2 mm/min geprüft. Die Prüftemperatur liegt üblicherweise bei Raumtemperatur (20–25  $^{\circ}\text{C}$ ). Zur Simulation von Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt können auch Hochtemperatur-Zugversuche (z. B. 500–800  $^{\circ}\text{C}$ ) durchgeführt werden. Die Ergebnisse müssen die Zugfestigkeit (Ziel 800–1000 MPa) und Dehnung (Ziel 10–20 %) bestätigen. Abweichungen  $> 5\%$  können auf eine Entmischung der Zusammensetzung oder Sinterfehler hinweisen.

**Härteprüfung** : Mit der Härteprüfung wird die Widerstandsfähigkeit einer Legierung gegen Verformung bewertet. Normalerweise wird hierfür die Vickers-Härte (HV) oder die Brinell-Härte (HB) gemäß ASTM

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

E92 verwendet. Bei der Vickers-Härteprüfung wird ein Diamanteindringkörper verwendet, der mit einer Last von 5–10 kgf belastet wird, 10–15 Sekunden gehalten wird und die Größe des Eindrucks misst. Typische Härtewerte liegen je nach Wolframgehalt zwischen 250 und 400 HV (z. B. kann 95W-4Ni-1Fe 350–400 HV erreichen). Die Härteprüfung muss an polierten Proben ( $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ ) durchgeführt werden. Um einheitliche Ergebnisse zu gewährleisten, müssen mindestens 5 Punkte geprüft werden, um den Durchschnittswert zu ermitteln. Abnorme Härtewerte können auf eine ungleichmäßige Mikrostruktur oder Einschlüsse hinweisen.

**Schlagzähigkeitsprüfung** : Die Schlagzähigkeitsprüfung dient der Bewertung der Bruchfestigkeit der Legierung unter Schlagbelastung. Sie folgt ASTM E23 und verwendet ein Charpy- oder Izod-Schlagprüfgerät. Als Prüfkörper dient ein Standard-Kerbstück ( $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$ , V-Kerbe). Die Prüftemperatur liegt bei Raumtemperatur oder niedrigen Temperaturen (z. B.  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ ), um extreme Bedingungen zu simulieren. Die Schlagzähigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen ist im Allgemeinen gering ( $10\text{--}30 \text{ J/cm}^2$ ), kann aber durch einen höheren Nickelgehalt verbessert werden. Die Prüfergebnisse dienen der Überprüfung der Zuverlässigkeit der Legierung bei Anwendungen mit hoher Schlagzähigkeit.

**Verschleißfestigkeitstest** : Der Verschleißfestigkeitstest bewertet die Leistung von Legierungen in Reibungsumgebungen mithilfe des Stift-Scheibe-Verschleißtests (ASTM G99). Der Test wird auf einer rotierenden Schleifscheibe (meist aus Aluminiumoxid oder Stahl) mit einer Belastung von 10–50 N, einer Gleitgeschwindigkeit von 0,1–1 m/s und einer Testdauer von 10–30 Minuten durchgeführt. Der Verschleiß wird anhand des Massenverlusts bzw. des Verschleißnarbenvolumens gemessen; die typische Verschleißrate liegt bei  $< 0,01 \text{ g/h}$ . Die Verschleißfestigkeit hängt von Härte und Mikrostruktur ab. Eine gleichmäßige Wolframpartikelverteilung und eine dichte Matrix können die Verschleißrate deutlich reduzieren. Die Testergebnisse dienen der Leistungsoptimierung von verschleißfesten Teilen für die Luft- und Raumfahrt oder von Industrieformen.

**Wichtige Prüfpunkte** : Die Prüfung mechanischer Eigenschaften erfordert den Einsatz kalibrierter Geräte, um sicherzustellen, dass die Probenoberfläche eben ( $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ ) ist und den Standardabmessungen entspricht. Die Prüfergebnisse sollten mit den Sollwerten verglichen werden, und Abweichungen sollten durch Mikrostrukturanalyse (z. B. SEM-EDS) auf die Ursache zurückgeführt werden. Zur Verbesserung der Zuverlässigkeit sollten mehrere Prüfungen (mindestens drei) gemittelt werden.

#### 4.2.2 Thermische Leistungsprüfung

Thermische Leistungstests dienen der Bewertung der Leistung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in Hochtemperatur- oder Wärmezyklusumgebungen, einschließlich Wärmeausdehnungskoeffizient, Wärmeleitfähigkeit und thermischer Stabilität.

Diese Eigenschaften sind entscheidend für Hochtemperaturanwendungen wie Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt und medizinische Abschirmkomponenten. Die folgenden Methoden werden häufig

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zur Prüfung der thermischen Leistung verwendet:

**Prüfung des Wärmeausdehnungskoeffizienten** : Mit der Prüfung des Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE) wird die Maßänderung einer Legierung bei Temperaturänderungen gemäß ASTM E831 gemessen. Mithilfe eines thermomechanischen Analysators (TMA) wird die Probe (Größe  $5 \times 5 \times 25$  mm) mit einer Heizrate von  $5 - 10$  °C/min auf  $100 - 800$  °C erhitzt und die lineare Ausdehnung aufgezeichnet. Der CTE einer Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung beträgt üblicherweise  $4,5 - 5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  und liegt damit nahe am Wert von reinem Wolfram ( $4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ). Zur Vermeidung von Oxidation muss die Prüfung in einem Inertgas (z. B. Argon) durchgeführt werden. Die Genauigkeitsanforderung beträgt  $\pm 0,1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Die Ergebnisse werden verwendet, um die Maßstabilität der Legierung in einer Umgebung mit thermischen Zyklen (z. B. Gegengewichten von Turbinenschaufeln) zu überprüfen.

**Wärmeleitfähigkeitstest** : Der Wärmeleitfähigkeitstest ermittelt die Wärmeleitfähigkeit der Legierung gemäß ASTM E1461 mithilfe der Laser-Flash-Methode (LFA). Die Probe (scheibenförmig,  $\phi 10$  mm  $\times$  2 mm) wird im Bereich von Raumtemperatur bis  $1000$  °C getestet. Der Laserpuls erhitzt eine Seite der Probe und der Infrarotdetektor misst die Temperaturreaktion auf der anderen Seite. Die Wärmeleitfähigkeit einer Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung beträgt je nach Wolframgehalt  $100 - 130$  W/mK. Der Test erfordert das Polieren der Probe ( $R_a < 0,1$   $\mu\text{m}$ ), um die Oberflächenstreuung zu reduzieren, und der Test wird dreimal wiederholt, um den Durchschnittswert zu ermitteln. Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit werden verwendet, um Kühlkörper für die Luft- und Raumfahrt oder Wärmeableitungskomponenten elektronischer Geräte zu optimieren.

**Thermischer Stabilitätstest** : Der thermische Stabilitätstest bewertet die Struktur- und Leistungsstabilität von Legierungen bei hohen Temperaturen. Er wird üblicherweise mithilfe der Differenzial-Scanning-Kalorimetrie (DSC, ASTM E1269) oder eines Hochtemperatur-Glühstests durchgeführt. Beim DSC-Test wird die Probe ( $5 - 10$  mg) unter Argonschutz auf  $1.200$  °C mit einer Heizrate von  $10$  °C/min erhitzt, um Phasenänderungen oder Oxidationsreaktionen zu erkennen. Glühstests werden in einem Vakuumofen ( $800 - 1.000$  °C,  $2 - 4$  Stunden) durchgeführt und Gewichtsverlust ( $< 0,1$  %) und mikrostrukturelle Veränderungen (wie z. B. durch metallografische Mikroskopbeobachtung) überprüft.

Die hohe thermische Stabilität der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung (dank des hohen Schmelzpunkts von Wolfram bei  $3.410$  °C) macht sie für Hochtemperaturanwendungen geeignet, und die Testergebnisse werden verwendet, um ihre Zuverlässigkeit in der Nuklearindustrie oder der Luft- und Raumfahrt zu überprüfen.

**Wichtige Prüfpunkte** : Thermische Prüfungen sollten in kontrollierter Atmosphäre durchgeführt werden, um eine oxidative Beeinträchtigung der Ergebnisse zu vermeiden. Die Probenvorbereitung sollte eine ebene Oberfläche und präzise Abmessungen gewährleisten. Die Prüfgeräte sollten regelmäßig kalibriert werden, um die Genauigkeit (Fehler  $< 1$  %) zu gewährleisten. Die Prüfergebnisse sollten mit den Sollwerten verglichen werden. Abnorme Werte können auf mikrostrukturelle Defekte oder

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Abweichungen in der Zusammensetzung hinweisen.

#### 4.2.3 Elektrische Leistungsprüfung

Elektrische Leistungsprüfungen dienen der Bewertung der Leitfähigkeit und des spezifischen Widerstands von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen, die deren Leistung in elektronischen Geräten, elektromagnetischen Anlagen oder militärischen Anwendungen beeinflussen. Die Leitfähigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen beträgt üblicherweise  $1,0 \times 10^7$  -  $1,5 \times 10^7$  S/m, der spezifische Widerstand  $6,7 \times 10^{-8}$  -  $1,0 \times 10^{-7}$   $\Omega \cdot m$ . Die folgenden Methoden werden häufig zur Prüfung der elektrischen Leistung verwendet:

**Leitfähigkeits-/Widerstandsprüfung :** Leitfähigkeits- und Widerstandsprüfungen werden mit der Vier-Sonden-Methode gemäß ASTM B193 durchgeführt. Die Prüflinge sind lange Streifen (Größe  $50 \times 5 \times 2$  mm) mit einer auf  $R_a < 0,1 \mu m$  polierten Oberfläche zur Verringerung des Kontaktwiderstands. Das Vier-Sonden-Gerät legt einen konstanten Strom (1 – 10 mA) an, misst den Spannungsabfall und berechnet den Widerstand. Die Prüfung wird bei Zimmertemperatur (20 – 25 °C) durchgeführt und kann zur Bewertung des Temperatureinflusses auch auf hohe Temperaturen (z. B. 500 °C) ausgedehnt werden. Der Widerstand von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen steigt mit der Temperatur leicht an (Temperaturkoeffizient von ca.  $0,004/^\circ C$ ), und die Prüfgenauigkeit muss  $\pm 0,1 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$  erreichen. Die Ergebnisse werden verwendet, um die Leistung der Legierung in Elektroden oder leitfähigen Teilen zu überprüfen.

**Oberflächenwiderstandsprüfung :** Die Oberflächenwiderstandsprüfung bewertet die elektrische Leitfähigkeit der Legierungsoberfläche und ist für Bauteile nach Beschichtung oder Oberflächenbehandlung anwendbar. Mit einem Megohmmeter oder Oberflächenwiderstandsprüfer wird eine Spannung von 100–500 V angelegt und der Oberflächenwiderstand (üblicherweise  $>10^9 \Omega$ ) gemessen. Die Prüfung muss in trockener Umgebung (Luftfeuchtigkeit  $<50\%$ ) durchgeführt werden. Die Probenoberfläche sollte sauber sein, um Verunreinigungen zu vermeiden. Die Ergebnisse der Oberflächenwiderstandsprüfung dienen zur Überprüfung der Isolationsleistung von Abschirmungen medizinischer Geräte oder elektronischer Bauteile.

**Prüfung magnetischer Eigenschaften (elektrizitätsbezogen) :** Der schwache Ferromagnetismus der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung (aus Nickel und Eisen) kann ihre elektrische Anwendung beeinträchtigen. Die Magnetisierungsintensität muss daher mit einem Vibrationsprobenmagnetometer (VSM) geprüft werden. Die Probe (Größe  $5 \times 5 \times 5$  mm) wird bei Raumtemperatur in ein 0–2 T starkes Magnetfeld gebracht und die Sättigungsmagnetisierungsintensität (0,1–0,3 T) gemessen. Die Prüfung dauert 10–20 Minuten. Das Gerät muss kalibriert werden, um eine Genauigkeit ( $\pm 1\%$ ) zu gewährleisten. Die Ergebnisse der magnetischen Eigenschaften dienen der Beurteilung der Eignung der Legierung für elektromagnetische Geräte, wie z. B. Gegengewichte zur elektromagnetischen Abschirmung.

**Wichtige Prüfpunkte :** Bei elektrischen Prüfungen muss sichergestellt werden, dass sich keine Oxidschicht oder Verunreinigungen auf der Probenoberfläche befinden. Der Kontaktpunkt muss stabil

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sein, um Messfehler zu reduzieren. Hochtemperaturprüfungen müssen unter Schutzgas (z. B. Argon) durchgeführt werden, um eine oxidative Beeinträchtigung der Leitfähigkeit zu verhindern. Die Prüfergebnisse sollten mit dem Sollwert verglichen werden. Abweichungen > 2 % können auf eine ungleichmäßige Zusammensetzung oder mikroskopische Defekte hinweisen, die zur Rückverfolgbarkeit eine SEM-EDS- oder XRD-Analyse erfordern.

#### 4.2.4 Magnetische Leistungsprüfung

Die magnetische Leistungsprüfung einer Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung dient der Bewertung ihrer magnetischen Eigenschaften. Diese beruhen hauptsächlich auf dem Ferromagnetismus von Nickel und Eisen, während Wolfram selbst ein paramagnetisches Material ist. Die Legierung weist üblicherweise einen schwachen Ferromagnetismus auf, wobei die Magnetisierungsintensität (Sättigungsmagnetisierungsintensität 0,1–0,3 T) durch den Nickel- (5–10 %) und Eisengehalt (2–5 %) beeinflusst wird. Die Prüfung der magnetischen Leistung ist entscheidend für die Anwendung von elektromagnetischen Verträglichkeitskomponenten in der Luft- und Raumfahrt, militärischen elektromagnetischen Geräten und medizinischen Geräten (z. B. MRT-Abschirmungen). Die folgenden Methoden werden häufig zur Prüfung der magnetischen Leistung verwendet:

**Test mit einem Vibrationsprobenmagnetometer (VSM) :** VSM ist die Hauptmethode zur Messung der Magnetisierung von Legierungen und folgt ASTM A894. Die Probe (Größe  $5 \times 5 \times 5$  mm oder Pulver) wird in ein 0–2 T-Magnetfeld mit einer Vibrationsfrequenz von 40–80 Hz gelegt und die Magnetisierungskurve (MH-Kurve) wird gemessen, um die Sättigungsmagnetisierung, Remanenz und Koerzitivfeldstärke zu bestimmen. Der Test wird bei Raumtemperatur (20–25 °C) oder hohen Temperaturen (z. B. 500 °C) durchgeführt und die Analysezeit beträgt 10–20 Minuten. Die Sättigungsmagnetisierung einer Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung liegt üblicherweise bei 0,1–0,3 T und die Koerzitivfeldstärke ist niedrig (<1000 A/m), was sie für Anwendungen zur elektromagnetischen Abschirmung geeignet macht. Der Test erfordert kalibrierte Geräte (Genauigkeit  $\pm 1$  %) und die Probenoberfläche muss poliert werden ( $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ ), um Interferenzen zu reduzieren.

**Magnetische Permeabilitätsprüfung :** Die magnetische Permeabilitätsprüfung bewertet die Reaktionsfähigkeit der Legierung auf ein externes Magnetfeld. Eine Ringprobe (20 mm Außendurchmesser, 10 mm Innendurchmesser, 5 mm Dicke) wird verwendet, und ein Wechselmagnetfeld mit einer Frequenz von 50 Hz bis 1 MHz wird mithilfe eines LCR-Messgeräts oder eines magnetischen Permeabilitätsprüfgeräts angelegt. Die relative magnetische Permeabilität einer Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung liegt üblicherweise bei 1,1–1,5, was auf ihren schwachen Ferromagnetismus hindeutet. Die Prüfung muss in einer Umgebung ohne externe Magnetfeldstörungen durchgeführt werden, um eine Genauigkeit von  $\pm 2$  % zu gewährleisten. Die Ergebnisse dienen der Überprüfung der Eignung der Legierung in elektromagnetischen Geräten, wie z. B. magnetischen Positionierungskomponenten.

**Hystereseverlusttest :** Der Hystereseverlusttest bewertet den Energieverlust der Legierung in einem magnetischen Wechselfeld mit einem BH-Ringtester gemäß ASTM A927. Die Probe hat die Form eines

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rings oder Stabs, und ein magnetisches Wechselfeld von 0,1–1 T wird mit einer Frequenz von 50–1000 Hz angelegt, um die Hystereseschleifenfläche zu messen. Der Hystereseverlust der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist gering ( $<10$  W/kg), was sie für Anwendungen in dynamischen Magnetfeldern geeignet macht. Die Testdauer beträgt 15–30 Minuten. Die Probertemperatur muss kontrolliert werden, um Störungen durch thermische Effekte zu vermeiden.

**Kernpunkte des Tests** : Magnetische Tests müssen sicherstellen, dass die Probe keine Oberflächenoxidation oder -verunreinigung aufweist, und die Testumgebung muss das externe Magnetfeld abschirmen. Die Ergebnisse sollten mit dem Zielwert verglichen werden. Abweichungen  $> 5$  % können auf eine ungleichmäßige Verteilung von Nickel und Eisen hinweisen. Eine Mikrostrukturanalyse mittels SEM-EDS ist erforderlich. Hochtemperaturtests müssen unter Argon-Schutz durchgeführt werden, um Oxidation zu verhindern. Die Testergebnisse werden verwendet, um die Legierungsformel (z. B. durch Anpassung des Nickel-Eisen-Verhältnisses) zu optimieren und den Anforderungen elektromagnetischer Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt oder im Militär gerecht zu werden.

#### 4.3 Qualitätszertifizierung und -standards

Qualitätszertifikate und -normen sind wichtige Garanten für die Leistung, Zuverlässigkeit und Marktkonformität von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Chinas nationale Normen bieten einheitliche Spezifikationen für die Herstellung, Prüfung und Anwendung von Legierungen hinsichtlich Zusammensetzung, Leistung und Prüfmethode. Die Einhaltung dieser Normen stellt sicher, dass die Legierungen die hohen Leistungsanforderungen der Luft- und Raumfahrt, des Militärs und der Medizin erfüllen und erleichtert gleichzeitig den internationalen Handel und die Qualitätszertifizierung. Im Folgenden werden die chinesischen nationalen Normen für Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen erläutert:

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

Chinas nationale Normen (GB-Normen) enthalten detaillierte Spezifikationen für die Herstellung und Prüfung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen und beziehen sich hauptsächlich auf GB/T 26036-2010 Schwere Wolframlegierungen und verwandte Materialnormen. Diese Normen spezifizieren die chemische Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften, die Dichte, die Mikrostruktur und die Prüfmethode der Legierung, um ihre Qualitätskonsistenz und Anwendungssicherheit zu gewährleisten:

**Chemische Zusammensetzung** : Gemäß GB/T 26036-2010 sollte der Wolframgehalt von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen 85–97 %, der Nickelgehalt 2–10 %, der Eisengehalt 1–5 % und der Gesamtgehalt an Verunreinigungen (wie Sauerstoff, Kohlenstoff, Schwefel)  $<0,1$  % betragen. Die Norm schreibt die Verwendung von XRF, ICP-AES oder GD-MS vor, um die Zusammensetzung mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,2$  % zu bestimmen und so eine hohe Dichte ( $16,5$ – $18,75$  g/cm<sup>3</sup>) und Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten. Beispielsweise muss für 90W-7Ni-3Fe ein Wolframgehalt von  $90 \pm 0,5$  % nachgewiesen werden, um die Anforderungen an militärische panzerbrechende Kerne zu erfüllen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Mechanische Eigenschaften** : Die Norm schreibt eine Zugfestigkeit von  $\geq 800$  MPa, eine Dehnung von  $\geq 10$  % und eine Vickershärte von 250–400 HV vor. Der Zugversuch erfolgt gemäß GB/T 228.1-2010, der Härtetest gemäß GB/T 231.1-2018. Die Ergebnisse müssen den Anforderungen an Gegengewichte für die Luft- und Raumfahrt (Zähigkeit an erster Stelle) oder militärische Komponenten (Festigkeit an erster Stelle) entsprechen. Bei Abweichungen über 5 % muss der Sinterprozess angepasst werden.

**Dichte und Mikrostruktur** : Die erforderliche Dichte beträgt 16,5–18,75 g/cm<sup>3</sup>, Dichte  $\geq 99$  %, geprüft mit der Archimedes-Methode (GB/T 1423–1996). Die Mikrostruktur sollte gleichmäßig sein, die Wolframpartikelgröße sollte 10–50 Mikrometer betragen, die Porosität  $< 1$  %, analysiert mit einem metallografischen Mikroskop oder einem Rasterelektronenmikroskop. Abnorme Porosität kann auf eine unzureichende Sintertemperatur hinweisen (erhöhte Temperatur auf 1450–1550 °C).

**Prüfmethoden** : Die Norm schreibt die Anwendung standardisierter Prüfmethoden vor, wie z. B. XRF, ICP-AES (Zusammensetzung), Zugversuch (mechanische Eigenschaften), TMA (Wärmeausdehnungskoeffizient  $4,5\text{--}5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) und LFA (Wärmeleitfähigkeit 100–130 W/ mK) . Die Prüfgeräte müssen regelmäßig kalibriert und die Prüfdaten aufgezeichnet werden und den Standardtoleranzen entsprechen.

**Anwendung und Zertifizierung** : GB/T 26036-2010 gilt für Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt, militärische panzerbrechende Kerne und medizinische Strahlenschutzteile. Produkte, die dem Standard entsprechen, können Qualitätszertifizierungen (wie ISO 9001 oder GJB 9001C) erhalten, um die Marktförderung und den internationalen Handel zu erleichtern. Hersteller müssen Prüfberichte vorlegen, um nachzuweisen, dass die Legierungseigenschaften den Standardanforderungen entsprechen.

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

Internationale Normen bieten weltweit einheitliche Spezifikationen für die Herstellung, Prüfung und Anwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen und gewährleisten so gleichbleibende Qualität, Leistung und grenzüberschreitenden Handel. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen finden aufgrund ihrer hohen Dichte (16,5–18,75 g/cm<sup>3</sup>), hohen Festigkeit (800–1000 MPa) und hervorragenden Korrosionsbeständigkeit breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, im Militär und in der Medizin. Die Internationale Organisation für Normung (ISO) und die Amerikanische Gesellschaft für Werkstoffprüfung und Werkstoffprüfung (ASTM) haben entsprechende Normen für chemische Zusammensetzung, mechanische Eigenschaften, Dichte und Prüfverfahren entwickelt. Die wichtigsten internationalen Normen sind:

**Wolframlegierungen für die Luft- und Raumfahrt** : Diese Norm legt die technischen Anforderungen an Wolframlegierungen (einschließlich Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen) für die Luft- und Raumfahrt fest. Die chemische Zusammensetzung erfordert einen Wolframgehalt von 85–97 %, einen Nickelgehalt von 2–10 %, einen Eisengehalt von 1–5 % und einen Gesamtgehalt an Verunreinigungen (wie Sauerstoff, Kohlenstoff und Schwefel) von  $< 0,1$  %. Die mechanischen Eigenschaften erfordern eine Zugfestigkeit von  $\geq 700$  MPa, eine Dehnung von  $\geq 10$  % und eine Vickershärte von 250–400 HV. Der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dichtebereich liegt zwischen 16,5 und 18,75 g/cm<sup>3</sup>, die Dichte bei  $\geq 99\%$ . Prüfmethode umfassen XRF oder ICP-AES (Zusammensetzungsanalyse), Zugversuch (ASTM E8), Härteprüfung (ISO 6507-1) und metallografische Analyse (ISO 643). Die Norm gilt für Gegengewichte und Ausgleichsblöcke, um Maßstabilität und Korrosionsbeständigkeit sicherzustellen.

**ASTM B777-15 (Hochdichte Wolframlegierung)** : ASTM B777 ist eine internationale Norm für Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Diese werden in vier Kategorien (Klasse 1–4) eingeteilt, entsprechend einem Wolframgehalt von 90–97 % und einer Dichte von 16,85–18,75 g/cm<sup>3</sup>. Beispielsweise erfordert Klasse 1 (90W-7Ni-3Fe) eine Dichte  $\geq 17,0$  g/cm<sup>3</sup>, eine Zugfestigkeit  $\geq 758$  MPa und eine Dehnung  $\geq 5\%$ . Zu den Prüfmethode gehören das Archimedes-Verfahren (Dichte), der Zugversuch (ASTM E8), die Härteprüfung (ASTM E92) und die SEM-EDS-Methode (Mikrostruktur). Die Norm erfordert die Überprüfung des Verunreinigungsgehalts (Sauerstoff  $< 0,05\%$ ), um Korrosions- und Strahlungsbeständigkeit sicherzustellen. Sie eignet sich für militärische panzerbrechende Kerne und medizinische Abschirmteile.

**ISO 9001:2015 (Qualitätsmanagementsystem)** : Obwohl nicht spezifisch für WNITROGEN, verpflichtet diese Norm Hersteller zur Einführung eines Qualitätsmanagementsystems, um die Konsistenz der Produktionsprozesse und die Produktleistung sicherzustellen. Die WNITROGEN-Produktion muss die ISO 9001-Zertifizierung erfüllen, einschließlich eines standardisierten Managements der Rohstoffbeschaffung, der Sinterprozesse und der Leistungsprüfung. Die Zertifizierung gewährleistet die Rückverfolgbarkeit der Produkte und erfüllt die internationalen Marktanforderungen.

**Anwendung und Bedeutung** : Internationale Normen wie ISO 20886 und ASTM B777 bilden die technische Grundlage für den weltweiten Handel mit Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen und gewährleisten deren Zuverlässigkeit in der Luft- und Raumfahrt (z. B. Gegengewichte), im Militär (z. B. panzerbrechende Kerne) und in der Medizin (z. B. Strahlenschutz). Hersteller müssen normgerechte Prüfberichte zur Überprüfung von Zusammensetzung, Leistung und Mikrostruktur vorlegen. Abweichungen (z. B. Wolframgehalt  $\pm 0,5\%$ ) müssen durch Prozessoptimierung korrigiert werden.

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

Verschiedene Länder und Regionen haben regionale Normen für Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen entwickelt, die auf ihren industriellen Anforderungen und technischen Eigenschaften basieren. Diese Normen sind in der Regel mit internationalen Normen (wie ASTM B777 oder ISO 20886) kompatibel, konzentrieren sich jedoch auf bestimmte Details, um sie an lokale Anwendungsszenarien (wie Militär, Luftfahrt oder Medizin) anzupassen. Im Folgenden sind die Normen für Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen wichtiger Länder wie Europa, Amerika, Japan und Südkorea aufgeführt:

**USA (ASTM B777-15 und MIL-T-21014D)** : Die USA verwenden ASTM B777-15 als Hauptnorm. Diese legt die Klassifizierung (Klasse 1–4), Zusammensetzung (Wolfram 90–97 %), Dichte (16,85–18,75 g/cm<sup>3</sup>) und Leistung (Zugfestigkeit 758–930 MPa) von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen detailliert

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fest. Die Rüstungsindustrie orientiert sich zudem an MIL-T-21014D (Militärspezifikation), die strengere Verunreinigungskontrollen (Sauerstoff < 0,03 %, Kohlenstoff < 0,02 %) und bessere mechanische Eigenschaften (Dehnung  $\geq 8$  %) vorschreibt, um den Anforderungen panzerbrechender Kerne und Gegengewichte in der Luftfahrt gerecht zu werden. Zu den Prüfmethode gehören ICP-AES (Zusammensetzung), Zugprüfung (ASTM E8) und metallografische Analyse (ASTM E45). Der US-Standard legt Wert auf hohe Leistung und Zuverlässigkeit und wird in der Verteidigungsindustrie häufig verwendet.

**Europa (EN 10204 vs. DIN) :** In Europa wird die Qualitätszertifizierung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen nach EN 10204 (Prüfzertifikat für metallische Werkstoffe) geregelt. Als Nachweis dafür, dass Zusammensetzung und Leistung den Konstruktionsanforderungen entsprechen, ist ein Prüfbericht Typ 3.1 oder 3.2 erforderlich. Deutsche DIN-Normen (wie DIN EN ISO 20886) entsprechen den ISO-Normen und legen Wert auf einen Wolframgehalt von 85–97 %, eine Dichte von 16,5–18,5 g/cm<sup>3</sup> und eine Zugfestigkeit von  $\geq 700$  MPa. Der Schwerpunkt europäischer Normen liegt auf Korrosionsbeständigkeit und Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur (Porosität < 1 %). Zu den Prüfmethode gehören XRF, SEM-EDS und TMA (Wärmeausdehnungskoeffizient  $4,5\text{--}5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ). Diese Normen gelten für Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt sowie für medizinische Strahlenschutzteile.

**Japan (JIS H 4463) :** Der japanische Industriestandard JIS H 4463 legt die technischen Anforderungen an hochdichte Wolframlegierungen fest, die auf Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen anwendbar sind. Der Standard erfordert einen Wolframgehalt von 88–95 %, ein einstellbares Nickel-Eisen-Verhältnis, eine Dichte von 16,5–18,5 g/cm<sup>3</sup>, eine Zugfestigkeit von  $\geq 750$  MPa und eine Dehnung von  $\geq 10$  %.

Zu den Prüfmethode gehören ICP-AES (Zusammensetzung), Zugprüfung (JIS Z 2241) und Härteprüfung (JIS Z 2245). Der japanische Standard legt Wert auf hochpräzise Verarbeitung und Oberflächenqualität ( $R_a < 0,8 \mu\text{m}$ ), die für Gegengewichte elektronischer Geräte und medizinische Ausrüstung geeignet ist. Japanische Hersteller kombinieren dies häufig mit einer ISO 9001-Zertifizierung, um sicherzustellen, dass ihre Produkte den internationalen Marktanforderungen entsprechen.

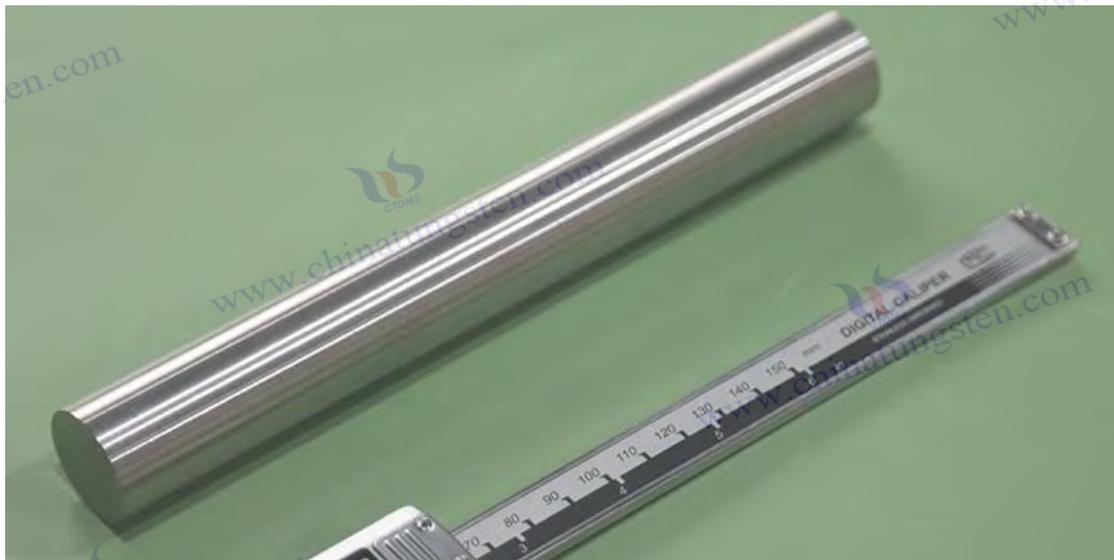
**Südkorea (KS D 9502) :** Die koreanische Norm KS D 9502 spezifiziert die Zusammensetzung und Eigenschaften hochdichter Wolframlegierungen mit einem Wolframgehalt von 85–95 %, einer Dichte von 16,5–18,75 g/cm<sup>3</sup>, einer Zugfestigkeit von  $\geq 700$  MPa und einer Vickershärte von 250–400 HV. Die Prüfmethode ähneln denen der ASTM B777 und umfassen das Archimedes-Verfahren (Dichte), Zugversuche und XRD (Mikrostrukturanalyse). Der Schwerpunkt der koreanischen Norm liegt auf Verschleißfestigkeit und thermischer Stabilität und eignet sich für Industrieformen sowie Komponenten für die Luft- und Raumfahrt. Südkorea verlangt außerdem die Einhaltung der RoHS-Richtlinie, die den Gehalt an schädlichen Verunreinigungen (wie Blei) begrenzt, um Umweltauflagen zu erfüllen.

**Andere Länder :** Länder wie Russland und Indien beziehen sich üblicherweise auf ASTM- oder ISO-Normen, können aber lokale Anpassungen vornehmen. Beispielsweise erfordert die russische GOST-Norm Zusammensetzungs- und Leistungsspezifikationen ähnlich ASTM B777, legt aber Wert auf

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tieftemperatur-Zähigkeitsprüfungen (-50 °C), um extremen Umweltbedingungen gerecht zu werden.

**Vergleich und Anwendung :** Europäische und amerikanische Normen (wie ASTM B777, EN 10204) konzentrieren sich stärker auf die hohen Leistungsanforderungen von Militär und Luft- und Raumfahrt, während japanische und koreanische Normen (JIS H 4463, KS D 9502) Wert auf Präzisionsverarbeitung und Umweltschutz legen. Die Normen aller Länder erfordern strenge Zusammensetzungs- (Wolfram  $\pm 0,5\%$ ) und Leistungsprüfungen (Zugfestigkeit  $\pm 5\%$ ). Zu den Prüfmethoden gehören XRF, ICP-AES und SEM-EDS. Hersteller müssen die entsprechenden Normen entsprechend dem Zielmarkt auswählen, um die Produktkonformität sicherzustellen .



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Kapitel 5 Anwendungsgebiete der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

### 5.1 Anwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden aufgrund ihrer hohen Dichte, hervorragenden mechanischen Eigenschaften, Korrosionsbeständigkeit und thermischen Stabilität häufig in der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt. Die Legierung kann den Bedarf an Hochleistungswerkstoffen in der Luft- und Raumfahrt decken, insbesondere in Szenarien, die hochdichte Gegengewichte oder Hochtemperaturumgebungen erfordern. Die einzigartigen Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung machen sie zu einem wichtigen Werkstoff für Geräte wie Flugzeuge, Raumfahrzeuge und Satelliten. Im Folgenden wird ihre Anwendung in Gegengewichtsmaterialien und hochtemperaturbeständigen Komponenten detailliert erläutert.

#### 5.1.1 Ausgleichsmaterialien

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen eignen sich aufgrund ihrer hohen Dichte ideal als Gegengewichtsmaterialien in der Luft- und Raumfahrt. Gegengewichte dienen dazu, den Schwerpunkt von Flugzeugen zu regulieren, die Flugstabilität zu gewährleisten oder die dynamische Leistung zu optimieren. Im Vergleich zu herkömmlichen Gegengewichtsmaterialien wie Blei bietet die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung die erforderliche Masse in einem kleineren Volumen und weist gleichzeitig eine bessere mechanische Festigkeit und Umweltfreundlichkeit auf. Sie erfüllt die Anforderungen der Luft- und Raumfahrt an geringes Gewicht und hohe Leistung.

**Anwendungsszenarien** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden häufig in Flugzeugquerrudern, -rudern, -höhenrudern und Hubschrauberrotor-Gegengewichten eingesetzt. In Verkehrsflugzeugen dienen Gegengewichte dazu, die Flügelbalance zu regulieren **und** die aerodynamische Stabilität während des Fluges zu gewährleisten. In Raumfahrzeugen wie Satelliten oder Raumstationen dienen Gegengewichte dazu, die Bahnlage zu korrigieren oder rotierende Teile zu stabilisieren.

**Leistungsvorteile** : Die hohe Dichte der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ermöglicht eine effiziente Gewichtsbalance und reduziert Volumen und Gewicht der Komponenten. Die geringe Wärmeausdehnung der Legierung gewährleistet ihre Formstabilität bei Temperaturschwankungen (z. B. bei niedrigen oder hohen Temperaturen in großer Höhe) und verhindert Verformungen durch thermische Spannungen. Dank ihrer hervorragenden Festigkeit und Zähigkeit hält sie Vibrationen und Stößen während des Fluges stand. Dank ihrer Korrosionsbeständigkeit eignet sich die Legierung zudem für den langfristigen Einsatz in Umgebungen mit Feuchtigkeit oder Salznebel, z. B. in großer Höhe oder über dem Meer.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen** : Gegengewichte werden üblicherweise pulvermetallurgisch hergestellt und durch maschinelle Bearbeitung hochpräzise gefertigt. Oberflächenbehandlungen können die Korrosionsbeständigkeit verbessern. Die Qualitätskontrolle muss eine gleichmäßige Dichte und eine konsistente Mikrostruktur der Gegengewichte gewährleisten, um eine

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

stabile Leistung zu gewährleisten.

### 5.1.2 Hochtemperaturbeständige Teile

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sind ein bevorzugtes Material für hochtemperaturbeständige Komponenten in der Luft- und Raumfahrtindustrie. Der hohe Schmelzpunkt und die thermische Stabilität von Wolfram, kombiniert mit der Oxidationsbeständigkeit und Zähigkeit von Nickel und Eisen, ermöglichen es der Legierung, ihre strukturelle Integrität und mechanischen Eigenschaften auch in Hochtemperaturumgebungen zu bewahren. Solche Komponenten finden wichtige Anwendung in Luft- und Raumfahrttriebwerken, Hot-End-Komponenten von Raumfahrzeugen und Antriebssystemen.

**Anwendungsszenarien** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden häufig in Turbinenschaufel-Gegengewichten, Düsenkomponenten oder Ausgleichsblöcken für das heiße Ende von Flugzeugtriebwerken eingesetzt. In Turbofan-Triebwerken dient die Legierung als Schaufel-Gegengewicht, um die Rotationsbalance zu optimieren und den Auswirkungen von Hochgeschwindigkeitsrotation und hochtemperiertem Gas standzuhalten. In Raumfahrzeugantriebssystemen wird die Legierung zur Herstellung von Halterungen für Düsen oder Brennkammerkomponenten verwendet, die kurzzeitig hohen Temperaturen und thermischen Belastungen standhalten müssen.

**Leistungsvorteile** : Die hohe Wärmeleitfähigkeit der Legierung ermöglicht eine schnelle Wärmeableitung und verhindert lokale Überhitzung. Dies eignet sich für das Wärmemanagement in Hochtemperaturumgebungen. Die geringe Wärmeausdehnung gewährleistet die Dimensionsstabilität der Bauteile bei schnellem Erhitzen oder Abkühlen und verhindert thermische Spannungsrisse. Die Oxidationsbeständigkeit von Nickel ermöglicht der Legierung, Oxidationskorrosion in heißer Luft zu widerstehen und ihre Lebensdauer zu verlängern. Dank ihrer Festigkeit und Zähigkeit hält die Legierung Vibrationen und mechanischen Belastungen stand.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen** : Hochtemperaturbeständige Teile werden durch Pulvermetallurgie in Kombination mit heißisostatischem Pressen hergestellt, um eine gleichmäßige Mikrostruktur und hohe Dichte zu gewährleisten. Die Bearbeitung erfordert den Einsatz von Werkzeugen mit hoher Härte. Oberflächenbehandlungen wie Beschichtungen können die Verschleißfestigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit weiter verbessern. Die Qualitätskontrolle erfordert die Überprüfung der Leistungsstabilität und Oxidationsbeständigkeit der Teile in Hochtemperaturumgebungen.

## 5.2 Verteidigung und Militär

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen finden aufgrund ihrer hohen Dichte (16,5–18,75 g/cm<sup>3</sup>), ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit 800–1000 MPa, Dehnung 10–20 %), ihrer Korrosionsbeständigkeit und thermischen Stabilität wichtige Anwendungsmöglichkeiten im Verteidigungs- und Militärbereich. Diese Legierung erfüllt die Anforderungen moderner Militärausrüstung an Hochleistungswerkstoffe, insbesondere in Szenarien, die eine hohe

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durchschlagskraft oder hohe Schutzwirkung erfordern. Die einzigartigen Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung machen sie zu einem idealen Werkstoff für Schlüsselkomponenten wie panzerbrechende Geschosse und Schutzpanzerungen. Ihre hohe Dichte und Festigkeit ermöglichen eine hervorragende Leistung unter extremen Bedingungen. Im Folgenden wird die Anwendung der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung in panzerbrechenden Geschossen und Schutzpanzerungen detailliert erläutert.

### 5.2.1 Panzerbrechende Materialien

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen haben sich aufgrund ihrer hohen Dichte, hervorragenden Festigkeit und moderaten Zähigkeit als Kernmaterial moderner panzerbrechender Munition etabliert. Panzerbrechende Munition wird in militärischer Ausrüstung wie Panzern, Panzerabwehrwaffen und Schiffsartillerie eingesetzt und ist darauf ausgelegt, feindliche gepanzerte Ziele wie Panzer oder gepanzerte Fahrzeuge zu durchdringen. Die hohe Dichte der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung verleiht dem Kern eine extrem hohe kinetische Energie, während ihre guten mechanischen Eigenschaften sicherstellen, dass der Kern auch bei Hochgeschwindigkeitseinschlägen seine strukturelle Integrität behält und so eine hervorragende panzerbrechende Wirkung erzielt.

**Anwendungsszenarien** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden häufig als Kernmaterial für kinetische panzerbrechende Geschosse (APFSDS, Armor-Piercing Fin-Stabilized Discarding Sabot) verwendet. Beispielsweise **werden** in Panzergranaten häufig Kerne aus Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen verwendet, die eine hohe Dichte und Festigkeit aufweisen und Hunderte Millimeter dicke gewalzte homogene Panzerungen (RHA) durchdringen können. In Panzerabwehrraketen oder Schiffsartillerie werden Kerne aus Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen eingesetzt, um modernen Verbundpanzerungen und reaktiven Panzerungen entgegenzuwirken und eine zuverlässige Durchschlagskraft zu gewährleisten. Die typische Formel lautet 90W-7Ni-3Fe oder 93W-5Ni-2Fe, um Dichte, Festigkeit und Zähigkeit in Einklang zu bringen.

**Leistungsvorteile** : Die hohe Dichte der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ( $17,0-18,5 \text{ g/cm}^3$ ) verleiht dem Kern bei hoher Abschussgeschwindigkeit eine extrem hohe kinetische Energie (die Anfangsgeschwindigkeit **kann**  $1.500-1.800 \text{ m/s}$  erreichen), was die Durchschlagskraft verbessert. Seine hohe Zugfestigkeit ( $800-1.000 \text{ MPa}$ ) und moderate Zähigkeit (Dehnung  $10-20 \%$ ) stellen sicher, dass der Kern beim Aufprall auf die Panzerung nicht leicht bricht oder sich übermäßig verformt und die kinetische Energie wirksam auf das Ziel übertragen kann. Die Wärmeleitfähigkeit der Legierung ( $100-130 \text{ W/mK}$ ) hilft, die beim Aufprall entstehende hohe Temperatur abzuleiten und zu verhindern, dass der Kern weich wird oder schmilzt. Zudem ermöglicht die Korrosionsbeständigkeit der Legierung (dank der Oxidationsbeständigkeit von Nickel) eine lange Lagerung in feuchter oder salzhaltiger Umgebung, was den vielfältigen Umwelтанforderungen militärischer Ausrüstung gerecht wird.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen** : Panzerbrechende Kerne werden üblicherweise pulvermetallurgisch in Kombination mit heißisostatischem Pressen hergestellt, um eine Dichte von  $>99,5 \%$  und eine gleichmäßige Mikrostruktur zu gewährleisten. Bei der Bearbeitung werden hochharte CBN-Werkzeuge mit einer Bearbeitungsgenauigkeit von  $\pm 0,01 \text{ mm}$  verwendet, um die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

geometrische Konsistenz des Kerns zu gewährleisten. Eine Wärmebehandlung kann die Härte (Vickershärte 350–400 HV) weiter erhöhen und die Penetration verbessern. Die Qualitätskontrolle muss den Standards ASTM B777 oder MIL-T-21014D entsprechen und eine Dichteabweichung von  $<0,2 \text{ g/cm}^3$ , eine Porosität von  $<1 \%$  sowie eine gleichbleibende Leistung durch Zugfestigkeitsprüfungen und metallografische Analysen gewährleisten. Oberflächenbeschichtungen (z. B. PVD TiN) können die Verschleißfestigkeit verbessern und die Lebensdauer des Kerns bei hoher Reibung verlängern.

## 5.2.2 Schutzpanzerung

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in Schutzpanzerungen kommen hauptsächlich in der hochdichten Abschirmschicht und den Verstärkungskomponenten von Verbundpanzerungen zum Einsatz. Sie werden häufig in Schutzsystemen von Panzern, gepanzerten Fahrzeugen und Schiffen eingesetzt. Schutzpanzerungen müssen Hochgeschwindigkeitsprojektilen, explosiven Stößen und extremen Umgebungsbedingungen standhalten. Die hohe Dichte, Festigkeit und Zähigkeit der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ermöglichen die effektive Absorption und Ableitung von Aufprallenergie und verbessern so die Schutzleistung der Panzerung. Darüber hinaus machen die Korrosionsbeständigkeit und thermische Stabilität der Legierung sie für den Langzeiteinsatz in rauen Umgebungen geeignet.

**Anwendungsszenarien** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden häufig in hochdichten Schichten von Verbundpanzerungen eingesetzt und mit Keramik, Stahl oder Polymermaterialien kombiniert, um mehrschichtige Schutzstrukturen zu bilden. Beispielsweise dienen Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in der Verbundpanzerung von Kampfpanzern (wie dem M1A2 Abrams) als Verstärkungsschichten, um die Aufprallenergie von kinetischen Energie-Penetratoren oder panzerbrechenden Granaten (HEAT) zu absorbieren. In gepanzerten Fahrzeugen oder Schiffen wird die Legierung zur Herstellung von Abschirmplatten in Schlüsselbereichen verwendet, um Insassen und Ausrüstung vor Splittern oder Explosionen zu schützen. Die typische Formel lautet 90W-7Ni-3Fe mit einer Dichte von  $17,0\text{--}18,0 \text{ g/cm}^3$  und bietet hervorragenden Schutz.

**Leistungsvorteile** : Die hohe Dichte der Legierung ( $16,5\text{--}18,75 \text{ g/cm}^3$ ) ermöglicht es, die kinetische Energie des Projektils **wirksam** zu absorbieren, die Durchdringungsgeschwindigkeit zu verringern und die Schutzeffizienz der Panzerung zu verbessern. Ihre hohe Zugfestigkeit (800–1000 MPa) und Zähigkeit (Dehnung 10–20 %) stellen sicher, dass die Panzerung bei Aufprall mit hoher Geschwindigkeit nicht so leicht bricht oder sich ablöst und mehreren Schlägen standhält. Die Wärmeleitfähigkeit ( $100\text{--}130 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) hilft dabei, die durch Explosion oder Aufprall entstehende augenblickliche hohe Temperatur abzuleiten und verhindert so lokale Erweichung oder Ablation. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient der Legierung ( $4,5\text{--}5,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) gewährleistet Dimensionsstabilität und vermeidet Risse bei Temperaturzyklen oder in explosiven Umgebungen. Die Korrosionsbeständigkeit (dank der NiO-Schutzschicht aus Nickel) macht sie geeignet für den Einsatz in Meeres- oder feuchten Umgebungen, beispielsweise als Schiffspanzerung.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen** : Schutzpanzerteile werden mittels Pulvermetallurgie in Kombination mit heißisostatischem Pressen hergestellt, um eine Dichte von  $>99,5 \%$  und eine

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gleichmäßige Mikrostruktur zu gewährleisten. Die Bearbeitung erfolgt mit Hartmetallwerkzeugen oder durch Funkenerosion (EDM), um komplexe Formen und hohe Präzision (Toleranz  $\pm 0,02$  mm) zu erreichen. Wärmebehandlung kann innere Spannungen abbauen und die Zähigkeit verbessern. Die Qualitätskontrolle muss den Standards MIL-T-21014D oder ASTM B777 entsprechen, um Dichte, Festigkeit und Porosität ( $< 1$  %) zu überprüfen. Oberflächenbehandlungen (wie CVD-WC-Beschichtung oder Ni-P-Galvanisierung) können die Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit erhöhen und die Lebensdauer der Panzerung verlängern. Mikrostrukturanalysen (wie SEM-EDS) dienen der Bestimmung der Wolframpartikelverteilung und der Gleichmäßigkeit der Matrix, um die Schutzleistung sicherzustellen.

### 5.3 Anwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen im medizinischen Bereich

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen finden aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer hervorragenden Strahlenbeständigkeit, ihrer guten mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit 800–1000 MPa, Dehnung 10–20 %) und ihrer Korrosionsbeständigkeit wichtige Anwendungsmöglichkeiten im medizinischen Bereich. Insbesondere in Bereichen, in denen hochenergetische Strahlung abgeschirmt oder Präzisionsteile hergestellt werden müssen, erfüllen Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen die Anforderungen medizinischer Geräte an Hochleistungswerkstoffe.

Ihre hohe Dichte und Strahlenbeständigkeit machen sie zur idealen Wahl für Abschirmkomponenten von CT-/MRT-Geräten und Kollimatoren von Strahlentherapiegeräten und verbessern deren Sicherheit und Präzision deutlich. Im Folgenden werden die spezifischen Anwendungen in diesen beiden Bereichen detailliert erläutert.

#### 5.3.1 Abschirmkomponenten für CT-/MRT-Geräte

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden häufig als Abschirmkomponenten in CT- (Computertomographie) und MRT-Geräten (Magnetresonanztomographie) eingesetzt, um Patienten, medizinisches Personal und Geräte vor den Strahlenwirkungen von Röntgen- oder Gammastrahlen zu schützen. CT-Geräte nutzen Röntgenbilder, und obwohl MRT-Geräte hauptsächlich Magnetfelder verwenden, können ihre Zusatzsysteme Strahlungsquellen enthalten, sodass effiziente Abschirmmaterialien erforderlich sind. Die hohe Dichte und Strahlungsbeständigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen ermöglichen eine effektive Dämpfung hochenergetischer Strahlung, während ihre mechanischen Eigenschaften und Korrosionsbeständigkeit die langfristige Zuverlässigkeit der Abschirmkomponenten gewährleisten.

**Anwendungsszenarien** : In CT-Geräten werden Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen zur Herstellung von Strahlenschutzschilden, Detektorabschirmplatten und Abschirmringen um Röntgenröhren verwendet, um Strahlungslecks zu verhindern. In MRT-Geräten dient die Legierung zur Abschirmung zusätzlicher Strahlungsquellen (wie radioaktiver Marker) oder elektromagnetischer Störungen, um die Gleichmäßigkeit des Magnetfelds zu gewährleisten. Die typische Formel lautet 95W-4Ni-1Fe. Dank ihrer hohen Dichte ( $18,0$ – $18,5$  g/cm<sup>3</sup>) bietet sie eine hervorragende Abschirmwirkung auf kleinem Raum

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und erfüllt so die Anforderungen an kompaktes Design medizinischer Geräte.

**Leistungsvorteile :** Dank der hohen Ordnungszahl ( $Z = 74$ ) und Dichte von Wolfram eignet es sich gut für den photoelektrischen Effekt und die Compton-Streuung und absorbiert effektiv Röntgen- und Gammastrahlen. Seine Abschirmwirkung übertrifft die von herkömmlichen Materialien wie Blei (Dichte  $11,34 \text{ g/cm}^3$ ) bei weitem. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient der Legierung ( $4,5\text{--}5,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) gewährleistet Dimensionsstabilität bei betriebsbedingter Hitzeentwicklung und verhindert Verformungen, die die Abschirmwirkung beeinträchtigen. Dank ihrer hohen Festigkeit (800–1000 MPa) und moderaten Zähigkeit (Dehnung 10–20 %) halten Abschirmkomponenten Gerätevibrationen und mechanischer Belastung stand. Die Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit von Nickel (Bildung einer NiO-Schutzschicht) gewährleistet die Langzeitstabilität der Komponenten in sterilisierten oder feuchten Umgebungen. Darüber hinaus ist die Legierung ungiftig und umweltfreundlich, bleibasierten Materialien überlegen und erfüllt die strengen Sicherheitsanforderungen im medizinischen Bereich.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen :** Abschirmkomponenten werden durch Pulvermetallurgie (Flüssigphasensintern,  $1450\text{--}1550 \text{ }^\circ\text{C}$ ) in Kombination mit heißisostatischem Pressen (HIP,  $1200\text{--}1400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $100\text{--}200 \text{ MPa}$ ) hergestellt, um eine Dichte von  $>99,5 \%$  und eine homogene Mikrostruktur zu gewährleisten. Die maschinelle Bearbeitung (wie Drehen, Fräsen) erfordert den Einsatz von CBN-Werkzeugen, um eine hohe Präzision (Toleranz  $\pm 0,01 \text{ mm}$ ) und Oberflächengüte ( $R_a < 0,4 \mu\text{m}$ ) zu erreichen. Eine Oberflächenbehandlung (wie Ni-P-Beschichtung oder Polieren) kann die Korrosionsbeständigkeit und Ästhetik weiter verbessern. Die Qualitätskontrolle muss den Normen ISO 20886 oder ASTM B777 entsprechen, um Dichte, Porosität ( $< 1 \%$ ) und Strahlungsbeständigkeit zu überprüfen, sowie XRF oder ICP-AES zur Bestimmung der Zusammensetzung. Die Mikrostrukturanalyse stellt sicher, dass die Wolframpartikel gleichmäßig ohne Einschlüsse oder Poren verteilt sind.

**Technische Herausforderungen und Optimierung :** Die hohe Härte der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung (Vickershärte 350–400 HV) erschwert die Verarbeitung. Werkzeuge und Schneidparameter müssen daher optimiert werden, um Kosten zu senken. In MRT-Geräten muss der schwache Ferromagnetismus der Legierung (Magnetisierungsintensität  $0,1\text{--}0,3 \text{ T}$ ) streng kontrolliert werden, um die Gleichmäßigkeit des Magnetfelds nicht zu beeinträchtigen. Die magnetischen Eigenschaften können durch eine Reduzierung des Eisengehalts (z. B. um 1–2 %) oder eine Wärmebehandlung optimiert werden. Additive Fertigung (z. B. SLM) ermöglicht zukünftig die Realisierung komplexer geformter Abschirmkomponenten, was die Designflexibilität und die Produktionseffizienz weiter verbessert.

### 5.3.2 Kollimatoren für Strahlentherapiegeräte

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden häufig als Kollimatormaterial in Strahlentherapiegeräten eingesetzt, um Richtung und Reichweite der Strahlen präzise zu steuern, gesundes Gewebe zu schützen und die Behandlungswirkung zu verbessern. Strahlentherapiegeräte (wie Linearbeschleuniger) verwenden hochenergetische Röntgen- oder Gammastrahlen zur Behandlung von Tumoren. Kollimatoren müssen daher eine extrem hohe Strahlenbeständigkeit und präzise Verarbeitungsleistung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aufweisen. Die hohe Dichte und die mechanischen Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ermöglichen es, diese strengen Anforderungen zu erfüllen und machen sie zum bevorzugten Material für Kollimatoren in Strahlentherapiegeräten.

**Anwendungsszenarien** : In Linearbeschleunigern werden Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen zur Herstellung von Mehrlamellenkollimatoren (MLCs) und Festkollimatoren verwendet. Mehrlamellenkollimatoren bestehen aus Dutzenden beweglicher Legierungslamellen, die die Form des Strahlenbündels dynamisch an die Tumorkontur anpassen können. Festkollimatoren dienen der Begrenzung des Strahlungsbereichs und dem Schutz des umgebenden gesunden Gewebes. Die typische Formel lautet 95W-4Ni-1Fe oder 97W-2Ni-1Fe. Dank ihrer hohen Dichte ( $18,0\text{--}18,75\text{ g/cm}^3$ ) können sie Strahlung effektiv abschirmen und das Volumen des Kollimators reduzieren .

**Leistungsvorteile** : Die hohe Dichte der Legierung und die hohe Ordnungszahl von Wolfram ermöglichen die effiziente Absorption energiereicher Strahlung, reduzieren Streuung und Leckagen und gewährleisten die Strahlpräzision. Die hohe Festigkeit (800–1000 MPa) und Zähigkeit (Dehnung 10–20 %) gewährleisten, dass sich die Kollimatorlamellen bei schneller Bewegung oder längerem Gebrauch nicht so leicht verformen oder brechen. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient ( $4,5\text{--}5,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) gewährleistet die geometrische Genauigkeit des Kollimators auch bei der durch den Betrieb des Strahlentherapiegeräts erzeugten Hitze. Die Korrosionsbeständigkeit der Legierung (dank der Oxidationsbeständigkeit von Nickel) ermöglicht ihr, dem Einfluss von Desinfektionsmitteln und feuchten Umgebungen standzuhalten, was ihre Lebensdauer verlängert. Im Vergleich zu Blei ist die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ungiftig und umweltfreundlich und erfüllt die Sicherheitsstandards für medizinische Geräte.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen** : Der Kollimator wird pulvermetallurgisch in Kombination mit heißisostatischem Pressen hergestellt, um eine Dichte von  $>99,5\%$  und eine porenfreie Struktur zu gewährleisten. Präzisionsbearbeitung ermöglicht die Herstellung komplexer Lamellen mit Toleranzen von  $\pm 0,005\text{ mm}$  und einer Oberflächenrauheit  $Ra < 0,2\ \mu\text{m}$  , um eine präzise Steuerung des Strahlungsbündels zu gewährleisten. Eine Wärmebehandlung kann Verarbeitungsspannungen eliminieren und die Zähigkeit verbessern. Oberflächenbeschichtungen können die Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit verbessern. Die Qualitätskontrolle muss den Normen ISO 13485 oder ASTM B777 entsprechen, um Zusammensetzung, Dichte und Mikrostruktur zu überprüfen und die Abschirmleistung durch Röntgentransmissionstests zu bestätigen.

**Technische Herausforderungen und Optimierung** : Die hohen Präzisionsanforderungen an den Kollimator erschweren die Verarbeitung. Um die Kosten zu senken, müssen moderne Geräte (wie Laserschneiden oder additive Fertigung) eingesetzt werden. Der schwache Ferromagnetismus der Legierung kann in Umgebungen mit starken Magnetfeldern leichte Störungen verursachen. Daher muss die Formel optimiert oder eine nichtmagnetische Beschichtung verwendet werden. 3D-Drucktechnologie ermöglicht zukünftig die kundenspezifische Herstellung von Mehrlamellenkollimatoren und verbessert so die Designflexibilität und Behandlungspräzision. Der Einsatz von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in Strahlentherapie-Kollimatoren hat die Sicherheit und Wirksamkeit der Strahlentherapie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

deutlich verbessert.

### 5.3.3 Präzisionsmedizinprodukte

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen finden aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften und ihrer Biokompatibilität wichtige Anwendungsmöglichkeiten in der Präzisionsmedizin. Präzisionsmedizinizingeräte erfordern in der Regel hochpräzise, kleinvolumige und hochzuverlässige Materialien, um die Leistungsanforderungen diagnostischer oder therapeutischer Geräte in komplexen Umgebungen zu erfüllen. Die hohe Dichte der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ermöglicht es, ausreichend Masse oder Abschirmwirkung auf kleinem Raum bereitzustellen, während ihre Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit die Langzeitstabilität des Geräts gewährleisten.

**Anwendungsszenarien** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden zur Herstellung kleiner Gegengewichte, Abschirmkomponenten oder Positionierungselemente in medizinischen Diagnosegeräten verwendet. Beispielsweise werden die Legierungen in Endoskopen oder Ultraschallgeräten als Mikro-Gegengewichte oder Abschirmkomponenten eingesetzt, um die Stabilität und Genauigkeit der Geräte bei komplexen Operationen zu gewährleisten. In Geräten zur Radioisotoptherapie werden die Legierungen zur Herstellung kleiner Abschirmbehälter verwendet, um medizinisches Personal vor Strahlung zu schützen.

**Leistungsvorteile** : Die hohe Dichte der Legierung ermöglicht eine effiziente Massenverteilung bzw. Strahlenabschirmung auf begrenztem Raum und eignet sich daher für miniaturisierte Designs. Dank ihrer hohen Festigkeit und Zähigkeit hält das Gerät Vibrationen und mechanischen Belastungen im Betrieb stand und verformt oder bricht auch bei längerem Gebrauch nicht. Die geringe Wärmeausdehnung gewährleistet die Dimensionsstabilität des Geräts bei Schwankungen der Körpertemperatur oder der Betriebstemperatur des Geräts. Die Korrosionsbeständigkeit der Legierung macht sie resistent gegen Erosion durch Desinfektionsmittel oder Körperflüssigkeiten und verlängert so die Lebensdauer des Geräts.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen** : Präzisionsmedizinische Geräte werden mittels Pulvermetallurgie in Kombination mit heißisostatischem Pressen hergestellt, um eine hohe Dichte und mikrostrukturelle Gleichmäßigkeit zu gewährleisten. Präzisionsbearbeitung (z. B. EDM oder Laserschneiden) ermöglicht die Herstellung komplexer Formen mit mikrometeregenen Toleranzen und extrem hoher Oberflächengüte zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß. Wärmebehandlung eliminiert Verarbeitungsspannungen und verbessert die Zähigkeit. Oberflächenbehandlungen verbessern die Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität. Die Qualitätskontrolle überprüft die Konsistenz der Zusammensetzung, die Gleichmäßigkeit der Dichte und die fehlerfreie Struktur, um die Zuverlässigkeit der Geräte im medizinischen Umfeld zu gewährleisten.

### 5.3.4 Gelenkgegengewichte für Chirurgieroboter

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden als Gelenkgewichtsmaterial in Operationsrobotern

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verwendet, um deren Bewegungsbalance und Operationsgenauigkeit zu optimieren. Operationsroboter (wie beispielsweise minimalinvasive chirurgische Systeme) erfordern eine hochpräzise Bewegungssteuerung und stabile mechanische Eigenschaften. Die Gewichtskomponenten tragen zum Ausgleich der Schwerkraft bei und verbessern die Positioniergenauigkeit in Gelenken oder Roboterarmen. Die hohe Dichte und die mechanischen Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung machen sie zu einem idealen Gewichtsmaterial.

**Anwendungsszenarien** : Bei Operationsrobotern werden Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen für Gelenkgewichte oder das Gleichgewicht des Roboterarms verwendet, um die Stabilität des Roboters bei anspruchsvollen Operationen wie Nähen oder Schneiden zu gewährleisten. Beispielsweise werden Legierungsgewichte in minimalinvasiven chirurgischen Robotersystemen eingesetzt, um das dynamische Gleichgewicht des Roboterarms anzupassen, Vibrationen zu reduzieren und die chirurgische Präzision zu verbessern. Bei orthopädischen oder neurochirurgischen Robotern tragen Gewichte dazu bei, die Stabilität und Kontrolle des Geräts bei komplexen Bewegungen aufrechtzuerhalten.

**Leistungsvorteile** : Die hohe Dichte ermöglicht der Legierung, auf kleinem Raum einen ausreichenden Gegengewichtseffekt zu erzielen, die Gewichtsverteilung der Roboterarme zu optimieren und den Energieverbrauch des Antriebssystems zu reduzieren. Ihre hohe Festigkeit und Zähigkeit gewährleisten, dass sich das Gegengewicht bei schnellen Bewegungen oder häufigem Betrieb nicht verformt oder durch Ermüdung bricht. Die geringe Wärmeausdehnung gewährleistet, dass das Gegengewicht auch bei Temperaturschwankungen im Operationssaal oder Betriebshitze formstabil bleibt. Die Korrosionsbeständigkeit der Legierung macht sie widerstandsfähig gegen chemische Erosion durch Desinfektionsmittel und Reinigungsverfahren und somit für den Langzeiteinsatz geeignet. Darüber hinaus wurde der schwache Ferromagnetismus der Legierung optimiert, sodass er das elektromagnetische System des Operationsroboters nicht stört.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen** : Gelenkgewichte werden mittels Pulvermetallurgie in Kombination mit heißisostatischem Pressen hergestellt, um eine hohe Dichte und eine porenfreie Struktur zu gewährleisten. Präzisionsbearbeitung (z. B. 5-achsige CNC-Bearbeitung oder EDM) dient der Herstellung komplexer Formen mit Toleranzen im Mikrometerbereich. Die Oberfläche muss zur Reibungsreduzierung hochglanzpoliert werden. Wärmebehandlung kann die Zähigkeit verbessern, und Oberflächenbeschichtungen (z. B. DLC) erhöhen die Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit. Die Qualitätskontrolle muss die Dichtegleichmäßigkeit, die mechanischen Eigenschaften und die Mikrostruktur überprüfen, um die Stabilität des Gewichts im dynamischen Betrieb sicherzustellen.

**Technische Herausforderungen und Optimierung** : Die Herstellung winziger Gegengewichte erfordert hochpräzise Geräte, was die Produktionskosten erhöht. Der Prozess muss optimiert werden, um die Effizienz zu steigern. Der Magnetismus der Legierung muss streng kontrolliert werden, um Störungen von Robotersensoren oder elektromagnetischen Systemen zu vermeiden. Dies lässt sich durch eine Reduzierung des Eisengehalts oder den Einsatz nichtmagnetischer Beschichtungen erreichen. Additive Fertigungstechnologien ermöglichen die individuelle Fertigung komplexer Gegengewichte und verbessern die Designflexibilität.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5.3.5 Mikrogewichte für die interventionelle Therapie

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden als Mikrogewichte in interventionellen Behandlungen eingesetzt und finden breite Anwendung in Kathetern, Führungsdrähten und implantierbaren medizinischen Geräten, um die Steuerbarkeit und Positionierungsgenauigkeit der Geräte zu verbessern. Interventionelle Behandlungen (wie die Implantation kardiovaskulärer Stents oder die neurointerventionelle Chirurgie) erfordern miniaturisierte, hochpräzise Geräte. Gewichte dienen dazu, die Balance des Geräts zu regulieren oder taktiles Feedback zu liefern, um Ärzten ein präzises Vorgehen zu ermöglichen. Die hohe Dichte und Biokompatibilität von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen machen sie zum bevorzugten Material für solche Anwendungen.

**Anwendungsszenarien** : In der kardiovaskulären interventionellen Behandlung werden Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen für Mikrogewichte an der Katheterspitze verwendet, um deren Balance und Flexibilität zu optimieren und Ärzten die Navigation in den Blutgefäßen zu erleichtern. In der neurointerventionellen Chirurgie werden Legierungsgewichte für Führungsdrähte oder Mikrosonden verwendet, um das Ziel präzise zu erreichen. Die Legierung kann auch für Gewichtskomponenten implantierbarer Geräte verwendet werden, beispielsweise für Ausgleichsteile von Herzschrittmachern oder Neurostimulatoren.

**Leistungsvorteile** : Dank der hohen Dichte bietet die Legierung ausreichend Masse auf kleinem Raum, optimiert die Gewichtsverteilung des Geräts und verbessert Steuerbarkeit und Stabilität. Ihre hohe Festigkeit und Zähigkeit gewährleisten, dass sich das Mikrogewicht bei komplexen Operationen nicht verformt oder bricht. Die geringe Wärmeausdehnung gewährleistet die Dimensionsstabilität des Geräts bei Körpertemperatur oder in chirurgischen Umgebungen. Die Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität der Legierung ermöglichen es ihr, Erosion durch Körperflüssigkeiten zu widerstehen und die Anforderungen einer Langzeitimplantation oder Mehrfachverwendung zu erfüllen. Ihre ungiftigen Eigenschaften gewährleisten die Einhaltung medizinischer Sicherheitsstandards.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen** : Mikrogewichte werden mittels Pulvermetallurgie oder Metallspritzguss (MIM) hergestellt, kombiniert mit heißisostatischem Pressen, um eine hohe Dichte und eine fehlerfreie Struktur zu gewährleisten. Mittels Ultrapräzisionsbearbeitung (wie Lasermikrobearbeitung oder Funkenerosion ) werden Komponenten im Mikrometerbereich mit Toleranzen von  $\pm 0,005$  mm und spiegelpolierten Oberflächen ( $R_a < 0,1 \mu\text{m}$  ) hergestellt. Wärmebehandlung optimiert die mechanischen Eigenschaften, und Oberflächenbehandlungen (wie chemische Vernickelung oder DLC-Beschichtung) verbessern die Biokompatibilität und Korrosionsbeständigkeit. Die Qualitätskontrolle muss Zusammensetzung, Dichte und Mikrostruktur überprüfen, um die Zuverlässigkeit und Sicherheit des Geräts bei interventionellen Behandlungen zu gewährleisten.

**Technische Herausforderungen und Optimierung** : Die Herstellung von Mikrogewichten ist anspruchsvoll und erfordert modernste Ausrüstung und Verfahren, um Genauigkeit und Kostenkontrolle zu gewährleisten. Die Mikrostruktur muss streng kontrolliert werden, um Poren oder Einschlüsse zu

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

vermeiden, die die Leistung beeinträchtigen. Zukünftig kann die 3D-Drucktechnologie die maßgeschneiderte Herstellung von Mikrogewichten ermöglichen, um personalisierte medizinische Bedürfnisse zu erfüllen und gleichzeitig die Produktionseffizienz zu verbessern.

#### 5.4 Anwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in Präzisionsinstrumenten

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen spielen aufgrund ihrer hohen Dichte, hervorragenden mechanischen Eigenschaften, guten Korrosionsbeständigkeit und geringen Wärmeausdehnung eine wichtige Rolle im Bereich der Präzisionsinstrumente. Präzisionsinstrumente stellen extrem hohe Anforderungen an ihre Materialien und müssen hohe Qualität, hohe Stabilität und hohe Präzision auf begrenztem Raum bieten. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen erfüllen diese Anforderungen und werden häufig in Bereichen eingesetzt, in denen präzises Gleichgewicht, Vibrationsdämpfung oder hohe Stabilität erforderlich sind. Ihre hohe Dichte und mechanische Festigkeit machen sie zu einem idealen Material für Gegengewichte und Schlüsselkomponenten von Präzisionsinstrumenten. Im Folgenden wird ihre Anwendung in Gegengewichten für Präzisionsinstrumente und Ausgleichsblöcken für Lithografiemaschinenplattformen detailliert erläutert.

##### 5.4.1 Präzisionsinstrumenten-Gegengewichte

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen werden häufig als Gegengewichtsmaterial in Präzisionsinstrumenten eingesetzt, um die Schwerpunktverteilung der Geräte zu optimieren und die Bewegungsgenauigkeit und -stabilität zu verbessern. Präzisionsinstrumente wie optische Messgeräte, Laser, wissenschaftliche Versuchsgерäte und hochwertige Prüfgeräte erfordern in der Regel einen präzisen Massenausgleich auf kompaktem Raum, um Vibrationen zu reduzieren, die Positioniergenauigkeit zu verbessern oder die langfristige Betriebsstabilität zu gewährleisten. Dank ihrer hohen Dichte und ihrer mechanischen Eigenschaften erfüllt die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung diese hohen Anforderungen.

**Anwendungsszenarien** : In optischen Messgeräten wie hochpräzisen Laserinterferometern oder Mikroskopen werden Gegengewichte aus Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen eingesetzt, um den Schwerpunkt des Geräts zu justieren und so die Stabilität des optischen Systems beim Bewegen oder Scannen zu gewährleisten. In wissenschaftlichen Experimentalgeräten wie Gravitationswellendetektoren oder hochpräzisen Waagen dienen Gegengewichte aus Legierungen dazu, externe Vibrationsstörungen zu unterdrücken und die Messempfindlichkeit zu verbessern. In High-End-Prüfgeräten wie Halbleiterprüfgeräten werden Gegengewichte eingesetzt, um die Balance von Roboterarmen oder Plattformen zu optimieren und Bewegungsfehler zu reduzieren.

**Leistungsvorteile** : Die hohe Dichte der Legierung ermöglicht ausreichend Masse auf kleinem Raum, was den Anforderungen an kompaktes Design von Präzisionsinstrumenten gerecht wird. Die geringe Wärmeausdehnung gewährleistet, dass das Gegengewicht auch bei Temperaturschwankungen (z. B. Labortemperaturunterschieden oder Betriebswärme) formstabil bleibt und thermische Verformungen vermieden werden. Dank seiner hervorragenden Festigkeit und Zähigkeit hält das Gegengewicht

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Vibrationen und Stößen im Gerätebetrieb stand und verhindert so Verformungen oder Ermüdungsbrüche. Die Korrosionsbeständigkeit der Legierung macht sie resistent gegen Erosion durch Chemikalien oder Feuchtigkeit in der Laborumgebung und verlängert so ihre Lebensdauer. Der schwache Ferromagnetismus der Legierung wurde optimiert, sodass er das elektromagnetische System von Präzisionsinstrumenten nicht stört und sich daher für hochempfindliche Anwendungen eignet.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen :** Präzisionsinstrumentengewichte werden üblicherweise durch Pulvermetallurgie (Flüssigphasensintern) in Kombination mit heißostatischem Pressen hergestellt, um eine hohe Dichte und mikrostrukturelle Gleichmäßigkeit zu gewährleisten. Präzisionsbearbeitung (z. B. 5-achsige CNC-Bearbeitung oder Funkenerosion) dient der Herstellung komplexer Formen mit Toleranzen im Mikrometerbereich. Die Oberfläche muss hochglanzpoliert werden, um Reibung und Verschleiß zu reduzieren. Wärmebehandlung kann Verarbeitungsspannungen eliminieren und die Zähigkeit verbessern. Oberflächenbehandlungen (z. B. chemische Vernickelung) verbessern die Korrosionsbeständigkeit und die Ästhetik. Die Qualitätskontrolle muss die Dichtegleichmäßigkeit, die mechanischen Eigenschaften und die fehlerfreie Struktur überprüfen, um die Stabilität des Gewichts im dynamischen Betrieb zu gewährleisten.

#### 5.4.2 Balance-Block der Lithografieplattform

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden als Plattformausgleichsblock in Fotolithografiemaschinen eingesetzt, um die Stabilität und Positioniergenauigkeit der Geräte bei der hochpräzisen Halbleiterfertigung zu gewährleisten. Fotolithografiemaschinen sind Kerngeräte der Halbleiterproduktion. Sie dienen zum Gravieren von mikro-nanoskaligen Schaltungsmustern auf Siliziumwafern und stellen extrem hohe Anforderungen an Vibrationsunterdrückung, Massenverteilung und thermische Stabilität.

Aufgrund ihrer hohen Dichte und geringen Wärmeausdehnung ist die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ein ideales Material für Plattformausgleichsblöcke, die die Leistung und Zuverlässigkeit von Fotolithografiegeräten wirksam verbessern können.

**Anwendungsszenarien :** In Lithografieanlagen für extrem ultraviolettes (EUV) oder tiefes ultraviolettes (DUV) Licht werden Ausgleichsgewichte aus Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen auf der Werkbank oder der optischen Plattform der Lithografieanlage eingesetzt, um die Massenverteilung zu optimieren, Vibrationen und Neigungen zu reduzieren und eine Positioniergenauigkeit der Siliziumwafer im Subnanometerbereich sicherzustellen. In Waferhandlungssystemen dienen Ausgleichsgewichte aus Legierungen als Gegengewichte für Roboterarme oder Transferplattformen, um das dynamische Gleichgewicht zu erhalten und die Produktionseffizienz zu verbessern. Ausgleichsgewichte dienen außerdem dazu, Mikrovibrationen während des Betriebs von Lithografieanlagen zu unterdrücken und optische Systeme vor Störungen zu schützen.

**Leistungsvorteile :** Die hohe Dichte der Legierung ermöglicht eine effiziente Massenverteilung auf begrenztem Raum, optimiert die dynamische Balance der Lithografieplattform und reduziert die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Auswirkungen mechanischer Vibrationen auf die Mustergenauigkeit. Die geringe Wärmeausdehnung gewährleistet, dass der Ausgleichsblock trotz der durch den Betrieb der Lithografiemaschine oder Umgebungstemperaturunterschiede erzeugten Wärme formstabil bleibt und geringfügige Verformungen durch thermische Belastung vermieden werden. Dank seiner hohen Festigkeit und Zähigkeit hält der Ausgleichsblock hochfrequenten Vibrationen und mechanischer Belastung stand und verhindert so Ermüdungsbrüche. Die Korrosionsbeständigkeit der Legierung macht sie resistent gegen Erosion durch Chemikalien (wie Reinigungsmittel) in der Reinraumumgebung der Lithografiemaschine und somit für den Langzeiteinsatz geeignet. Darüber hinaus ist die Legierung auf geringen Magnetismus optimiert und stört weder die elektromagnetischen noch die optischen Systeme der Lithografiemaschine.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen** : Die Ausgleichsgewichte werden mittels Pulvermetallurgie in Kombination mit heißisostatischem Pressen hergestellt, um eine hohe Dichte und porenfreie Struktur zu gewährleisten. Mittels Ultrapräzisionsbearbeitung (z. B. Laser-Mikrobearbeitung oder 5-achsige CNC-Bearbeitung) werden komplexe Formen mit Toleranzen im Submikrometerbereich und extrem hohen Anforderungen an die Oberflächengüte zur Reduzierung von Vibrationen und Reibung hergestellt. Wärmebehandlung optimiert die mechanischen Eigenschaften, und Oberflächenbeschichtungen (z. B. DLC oder TiN) erhöhen die Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit. Die Qualitätskontrolle erfordert die Überprüfung der Dichtekonsistenz, der mikrostrukturellen Gleichmäßigkeit und der mechanischen Eigenschaften sowie metallografische Analysen und Vibrationstests, um die Stabilität der Ausgleichsgewichte im Hochfrequenzbetrieb sicherzustellen.

**Technische Herausforderungen und Optimierung** : Der Ausgleichsblock der Lithografiemaschine stellt extrem hohe Anforderungen an die Verarbeitungsgenauigkeit. Um Toleranzen im Submikrometerbereich zu gewährleisten, sind fortschrittliche Geräte und Verfahren erforderlich, was die Produktionskosten erhöht. Die Mikrostruktur muss fehlerfrei sein, um Schwingungsverstärkungen zu vermeiden. Die Sinter- und Wärmebehandlungsparameter müssen streng kontrolliert werden. Der Magnetismus der Legierung muss weiter optimiert werden, um die extrem geringe Toleranz der Lithografiemaschine gegenüber elektromagnetischen Störungen zu erfüllen. Dies kann durch eine Anpassung der Formel oder eine nichtmagnetische Oberflächenbehandlung erreicht werden.

#### 5.4.3 Dämpfungsblock für Hochgeschwindigkeits-Werkzeugmaschinen spindeln

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden aufgrund ihrer hohen Dichte, hervorragenden mechanischen Eigenschaften und guten Schwingungsdämpfung häufig als Dämpfungsblock für Spindeln von Hochgeschwindigkeitswerkzeugmaschinen im Bereich der Präzisionsinstrumente eingesetzt. Hochgeschwindigkeitswerkzeugmaschinen (wie CNC-Werkzeugmaschinen, Schleifmaschinen oder Drehmaschinen) erzeugen bei hohen Drehzahlen erhebliche Vibrationen und dynamische Belastungen, was zu einer verringerten Bearbeitungsgenauigkeit oder erhöhtem Werkzeugverschleiß führen kann. Spindeldämpfungsböcke unterdrücken effektiv Vibrationen und verbessern die Bearbeitungsstabilität und Oberflächenqualität von Werkzeugmaschinen durch erhöhte Masse und optimierte Dämpfung. Die hohe Dichte und die mechanischen Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung machen sie zu einem idealen Material für Dämpfungsböcke, die die Leistung von Werkzeugmaschinen in

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochgeschwindigkeits- und Hochspannungsumgebungen gewährleisten.

**Anwendungsszenarien** : Spindeldämpfungsblöcke aus Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung werden im Spindelsystem von Hochgeschwindigkeits-CNC-Werkzeugmaschinen eingesetzt, insbesondere in der Präzisionsbearbeitung, beispielsweise bei der Herstellung von Luft- und Raumfahrtteilen, Automotorkomponenten oder Halbleitergeräten. Der Dämpfungsblock wird an der Spindel oder ihrer Trägerstruktur montiert, um Schwingungen oder Resonanzen der Spindel bei hohen Drehzahlen (z. B. Zehntausenden Umdrehungen pro Minute) durch Anpassung der Massenverteilung und Absorption von Schwingungsenergie zu reduzieren. Dieser Dämpfungsblock wird auch in hochpräzisen Dreh- und Schleifmaschinen eingesetzt, um eine hohe Oberflächengüte und Maßgenauigkeit der bearbeiteten Oberfläche zu gewährleisten.

**Leistungsvorteile** : Die hohe Dichte der Legierung ermöglicht die Bereitstellung ausreichender Masse auf begrenztem Raum. Dies optimiert das dynamische Gleichgewicht der Spindel und reduziert die Schwingungsamplitude deutlich. Seine hohe Festigkeit und Zähigkeit stellen sicher, dass sich der Dämpfungsblock bei hohen Drehzahlen und periodischer Belastung nicht verformt oder einen Ermüdungsbruch erleidet und der dynamischen Belastung des Werkzeugmaschinenbetriebs lange standhält. Dank der geringen Wärmeausdehnung behält der Dämpfungsblock seine Dimensionsstabilität auch bei der durch Reibung oder Motor während der Bearbeitung erzeugten Wärme. Dadurch werden thermische Verformungen vermieden, die die Spindelgenauigkeit beeinträchtigen. Die Korrosionsbeständigkeit der Legierung macht sie widerstandsfähig gegen chemische Erosion durch Kühl- und Schmiermittel der Werkzeugmaschine und somit für den Langzeiteinsatz geeignet. Darüber hinaus wurde der schwache Ferromagnetismus der Legierung optimiert, sodass er das elektromagnetische Steuerungssystem der Werkzeugmaschine nicht stört und sich daher für hochpräzise elektronische Geräte eignet.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen** : Spindeldämpfungsblöcke werden mittels Pulvermetallurgie (Flüssigphasensintern) in Kombination mit heißisostatischem Pressen hergestellt, um eine hohe Dichte und mikrostrukturelle Gleichmäßigkeit für eine hervorragende Dämpfungsleistung zu gewährleisten. Präzisionsbearbeitung (z. B. 5-achsige CNC-Bearbeitung oder EDM) dient der Herstellung komplexer Formen mit Toleranzen im Mikrometerbereich und hochglanzpolierten Oberflächen zur Reduzierung von Reibung und Schwingungsverstärkung. Wärmebehandlung (z. B. Glühen) eliminiert Verarbeitungsspannungen und verbessert die Zähigkeit. Oberflächenbehandlungen (z. B. chemische Vernickelung oder DLC-Beschichtung) erhöhen die Korrosions- und Verschleißfestigkeit. Die Qualitätskontrolle erfordert die Überprüfung der Dichtekonsistenz, der mechanischen Eigenschaften und der fehlerfreien Struktur sowie Schwingungstests und metallografische Analysen, um die Stabilität des Dämpfungsblocks bei hochfrequenten Schwingungen sicherzustellen.

**Technische Herausforderungen und Optimierung** : Hohe Dichte und Härte erschweren die Verarbeitung. Zur Kostenkontrolle sind hochpräzise Geräte und optimierte Schnittparameter erforderlich. Die Mikrostruktur muss streng kontrolliert werden, um Poren oder Einschlüsse zu vermeiden, die die Dämpfungswirkung beeinträchtigen. Der Magnetismus der Legierung muss weiter optimiert werden,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

um Störungen der Präzisionssensoren der Werkzeugmaschine zu vermeiden. Dies kann durch eine Reduzierung des Eisengehalts oder den Einsatz nichtmagnetischer Beschichtungen erreicht werden.

#### 5.4.4 Komponenten zur Vibrationsreduzierung bei Präzisionsoptikplattformen

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden als Schwingungsdämpfungskomponente in optischen Präzisionsplattformen eingesetzt, um externe und interne Vibrationen zu unterdrücken und die hohe Präzision und Stabilität optischer Systeme zu gewährleisten. Optische Präzisionsplattformen werden häufig in Lasern, optischen Messgeräten, Mikroskopen, Halbleiterlithografiegeräten und anderen Bereichen eingesetzt und stellen extrem hohe Anforderungen an die Schwingungsdämpfung, da bereits geringe Vibrationen zu Fehlausrichtungen optischer Komponenten oder Messfehlern führen können. Die hohe Dichte und die hervorragenden mechanischen Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ermöglichen eine effektive Absorption und Dämpfung von Vibrationen und machen sie zu einem bevorzugten Material für Schwingungsdämpfungskomponenten.

**Anwendungsszenarien** : In optischen Präzisionsplattformen werden Schwingungsdämpfungskomponenten aus Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen als Stützstrukturen oder Isolationssysteme eingesetzt, um Vibrationen vom Boden, vom Gerätebetrieb oder aus der Umgebung zu absorbieren. Beispielsweise werden in Laserinterferometern oder hochauflösenden Mikroskopen Schwingungsdämpfungsblöcke aus Legierungen als Plattformbasen oder Stützrahmen verwendet, um die Position optischer Komponenten zu stabilisieren. In Halbleiterlithografiemaschinen werden Schwingungsdämpfungskomponenten zur Isolierung von Plattformen eingesetzt, um zu verhindern, dass Vibrationen die Charakterisierung von Subnanometermustern beeinträchtigen. Schwingungsdämpfungskomponenten können auch im Stützsystem astronomischer Teleskope eingesetzt werden, um die Stabilität des Spiegels in einer Umgebung mit Mikrovibrationen zu gewährleisten.

**Leistungsvorteile** : Die hohe Dichte der Legierung sorgt für ausreichend Masse, erhöht die Trägheit der Plattform und reduziert die Amplitude der Schwingungsübertragung. Ihre hohe Festigkeit und Zähigkeit gewährleisten, dass sich die Schwingungsdämpfungskomponenten bei Langzeitschwingungen oder dynamischen Belastungen nicht verformen oder ermüden, wodurch die strukturelle Integrität der Plattform erhalten bleibt. Die geringe Wärmeausdehnung ermöglicht es den Komponenten, ihre Formstabilität auch bei Temperaturunterschieden im Labor oder Betriebshitze zu bewahren und so kleine, durch thermische Belastung verursachte Verschiebungen zu vermeiden. Die Korrosionsbeständigkeit der Legierung macht sie resistent gegen Erosion durch Chemikalien oder Feuchtigkeit in der Laborumgebung und somit für den Langzeiteinsatz geeignet. Der optimierte schwache Ferromagnetismus stört weder das elektromagnetische System noch die hochempfindlichen Sensoren der optischen Plattform und erfüllt so die Anforderungen an hohe Präzision.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen** : Schwingungsdämpfende Komponenten werden mittels Pulvermetallurgie in Kombination mit heißisostatischem Pressen hergestellt, um eine hohe Dichte und eine gleichmäßige Mikrostruktur zur Optimierung der Schwingungsdämpfung zu gewährleisten. Mittels Ultrapräzisionsbearbeitung (z. B. Lasermikrobearbeitung oder 5-achsige CNC-Bearbeitung) werden

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

komplexe Formen mit Submikrometertoleranzen und hochglanzpolierten Oberflächen zur Reduzierung der Schwingungsverstärkung hergestellt. Wärmebehandlung optimiert die mechanischen Eigenschaften, und Oberflächenbeschichtungen (z. B. TiN oder DLC) erhöhen die Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit. Die Qualitätskontrolle erfordert die Überprüfung der Dichtegleichmäßigkeit, der mechanischen Eigenschaften und der porenfreien Struktur sowie Schwingungstests und Spektralanalysen, um die schwingungsdämpfende Wirkung der Komponenten sicherzustellen.

**Technische Herausforderungen und Optimierung** : Die Bearbeitungspräzision der Schwingungsdämpfungskomponenten ist extrem hoch. Um Toleranzen im Submikrometerbereich zu gewährleisten, sind moderne Geräte erforderlich, was die Produktionskosten erhöht. Die Mikrostruktur muss fehlerfrei sein, um eine Schwingungsverstärkung zu vermeiden. Die Sinter- und Wärmebehandlungsparameter müssen streng kontrolliert werden. Die magnetischen Eigenschaften der Legierung müssen optimiert werden, um die geringe Toleranz der optischen Plattform gegenüber elektromagnetischen Störungen zu erfüllen. Dies kann durch eine Anpassung der Formel oder eine nichtmagnetische Oberflächenbehandlung erreicht werden.

## 5.5 Weitere Anwendungen von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen mit ihrer hohen Dichte, ihren hervorragenden mechanischen Eigenschaften, ihrer Korrosionsbeständigkeit und thermischen Stabilität finden nicht nur breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin und in der Präzisionsinstrumententechnik, sondern bieten auch einzigartiges Potenzial in neuen Technologien. Dank ihrer hohen Dichte und ihrer mechanischen Eigenschaften gewinnen Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen zunehmend an Bedeutung in den Bereichen 3D-Drucktechnologie und Energie. Diese Bereiche stellen hohe Anforderungen an die Materialleistung, und Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen bieten zuverlässige Lösungen für die Anforderungen komplexer Fertigung und extremer Umgebungen. Im Folgenden wird ihr Anwendungspotenzial in den Bereichen 3D-Drucktechnologie und Energie detailliert erläutert.

### 5.5.1 Anwendung der 3D-Drucktechnologie

Die Anwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung in der 3D-Drucktechnologie (Additiv Die 3D-Drucktechnologie (auch bekannt als 3D-Drucktechnologie) hat sich in Forschung und Industrie zunehmend zu einem wichtigen Thema entwickelt. 3D-Druck ermöglicht die direkte Herstellung komplexer Bauteile durch schichtweises Aufeinanderschichten von Materialien und bietet so Flexibilität für die schnelle Prototypenentwicklung von Hochleistungskomponenten. Die hohe Dichte und die mechanischen Eigenschaften der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung bieten erhebliche Vorteile für 3D-gedruckte Bauteile, die hohe Festigkeit, Verschleißfestigkeit und komplexe Geometrie erfordern, insbesondere bei Kleinserien und kundenspezifischer Produktion.

**Anwendungsszenarien** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden zur Herstellung komplex geformter Teile wie Gegengewichten für die Luft- und Raumfahrt, medizinischen Abschirmteilen und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dämpfungsblöcken für Präzisionsinstrumente mittels selektivem Laserschmelzen (SLM) oder Elektronenstrahlschmelzen (EBM) verwendet. In der Industrie kann die Legierung zum Drucken hochverschleißfester Formen oder Werkzeugeile wie Einsätzen für Spritzgussformen oder verstärkten Teilen für Schneidwerkzeuge verwendet werden. In der wissenschaftlichen Forschung werden 3D-gedruckte Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen zur Herstellung kundenspezifischer Teile für experimentelle Geräte verwendet, beispielsweise hochdichte Gegengewichte oder strahlungsresistente Abschirmteile.

**Leistungsvorteile:** Die hohe Dichte der Legierung erfüllt die Anforderungen 3D-gedruckter Teile an eine präzise Gewichtsverteilung auf begrenztem Raum. Diese Eigenschaft ist besonders wichtig für die präzise Gewichtsverteilung. Beispielsweise ist es bei Gyroskopkomponenten von Luft- und Raumfahrtgeräten erforderlich, auf kleinstem Raum ein präzises Gewichtsverhältnis zu erreichen, um einen ausgewogenen Betrieb der Geräte zu gewährleisten. Die Legierung erfüllt diese hohen Anforderungen dank ihrer hohen Dichte optimal. Bei Abschirmanwendungen in der Nuklearindustrie kann eine hohe Dichte das Eindringen von Strahlung wirksam blockieren und so Ausrüstung und Personal zuverlässig schützen. Selbst komplexe, speziell geformte Abschirmteile können nach der Herstellung im 3D-Druckverfahren eine gleichmäßige Verteilung hoher Dichte beibehalten, um die Stabilität der Abschirmwirkung zu gewährleisten. Die Kombination aus hoher Festigkeit und Zähigkeit gewährleistet die Zuverlässigkeit der gedruckten Teile. Präzisionsgetriebeteile von Automotoren müssen dynamischen Belastungen und komplexen mechanischen Beanspruchungen lange standhalten. Die aus dieser Legierung hergestellten Teile können nicht nur hochfrequenten Krafteinwirkungen standhalten, sondern behalten auch unter extremen Arbeitsbedingungen ihre strukturelle Integrität. Dadurch werden Geräteausfälle durch Verformung oder Bruch an der Wurzel vermieden und die Wartungskosten erheblich gesenkt. Durch die geringe Wärmeausdehnung bleiben die Teile während des Druckvorgangs und den anschließenden Temperaturänderungen in der Nutzungsumgebung dimensionsstabil. Beim Drucken von Sensorhalterungen in Hochtemperatur-Industrieöfen schwankt die Temperatur erheblich zwischen dem geschmolzenen Zustand bei hoher Temperatur während des Druckvorgangs und der dauerhaft hohen Umgebungstemperatur während des Gebrauchs und anschließendem Abkühlvorgang nach dem Herunterfahren. Die geringe Wärmeausdehnung der Legierung kann Maßabweichungen von Komponenten aufgrund von Wärmeausdehnung und -kontraktion vermeiden, die präzise Koordination von Sensoren und anderen Komponenten sicherstellen und die Genauigkeit der Erfassungsdaten aufrechterhalten.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen :** Der 3D-Druck von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen erfordert die Verwendung hochreiner Mischpulver (Wolfram, Nickel, Eisen) oder vorlegierter Pulver, die unter hohem Energieeintrag mittels SLM oder EBM schichtweise geschmolzen werden. Der Druckprozess muss Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Schichtdicke optimieren, um eine hohe Dichte und Porenfreiheit zu gewährleisten. Nach dem Druck wird üblicherweise heißisostatisches Pressen (HIP) durchgeführt, um winzige Poren zu beseitigen und die mechanischen Eigenschaften zu verbessern. Präzise Nachbearbeitung (wie CNC-Bearbeitung oder Polieren) wird eingesetzt, um hohe Präzision und Oberflächengüte zu erreichen. Die Qualitätskontrolle muss die Konsistenz der Zusammensetzung, die Gleichmäßigkeit der Dichte und die Mikrostruktur überprüfen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und durch XRF, SEM-EDS und Zugversuche sicherstellen, dass die gedruckten Teile den Standards der Luft- und Raumfahrt oder Medizin entsprechen.

**Technische Herausforderungen und Optimierung** : Der hohe Schmelzpunkt und die hohe Wärmeleitfähigkeit von Wolfram führen beim Drucken zu großen Temperaturgradienten, die anfällig für Risse oder Eigenspannungen sind. Druckparameter (wie die Energiedichte) müssen optimiert werden, um die Qualität zu verbessern. Die Pulverkosten sind hoch und müssen durch Recycling oder eine Verbesserung des Pulverherstellungsprozesses gesenkt werden. Der schwache Ferromagnetismus der Legierung muss kontrolliert werden, um Störungen bei hochpräzisen Geräten zu vermeiden. Dies kann durch Anpassung der Formel oder Oberflächenbehandlung behoben werden.

### 5.5.2 Potenziale im Energiesektor

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen haben ein erhebliches Anwendungspotenzial im Energiesektor gezeigt, insbesondere in Bereichen, die hochdichte, hochtemperaturbeständige und korrosionsbeständige Materialien erfordern, wie beispielsweise in der Kernenergie, bei erneuerbaren Energien und bei Energiespeicheranlagen. Extreme Umgebungen im Energiesektor (wie hohe Temperaturen, hohe Strahlung oder korrosive Atmosphäre) stellen hohe Anforderungen an die Materialeistung. Die einzigartigen Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen ermöglichen es, diese Anforderungen zu erfüllen und die Effizienz und Zuverlässigkeit von Energieanlagen zu unterstützen.

**Anwendungsszenarien** : Im Bereich der Kernenergie werden Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen für Strahlenschutzkomponenten oder Steuerstab-Gegengewichte von Kernreaktoren eingesetzt, um Neutronen und Gammastrahlen zu absorbieren und so Ausrüstung und Personal zu schützen. Im Bereich der erneuerbaren Energien werden die Legierungen für Rotorblatt-Gegengewichte von Windkraftanlagen verwendet, um die Rotationsbalance zu optimieren und die Effizienz der Stromerzeugung zu verbessern. In Energiespeichern können die Legierungen als Gegengewichte für Batterieprüfgeräte oder Energieumwandlungsgeräte eingesetzt werden, um den Systembetrieb zu stabilisieren. Darüber hinaus können die Legierungen auch zur Herstellung korrosionsbeständiger Komponenten für Hochtemperatur-Brennstoffzellen oder Geothermieanlagen verwendet werden.

**Leistungsvorteile** : Die hohe Dichte der Legierung und die hohe Ordnungszahl von Wolfram ermöglichen eine effektive Strahlungsabschirmung und eignen sich daher für Abschirmanwendungen in der Kernenergie. Ihre hohe Festigkeit und Zähigkeit gewährleisten die strukturelle Stabilität der Komponenten bei hohen Temperaturen und mechanischer Belastung und eignen sich daher für die dynamische Umgebung in Energieanlagen. Dank der geringen Wärmeausdehnung behält die Legierung ihre Dimensionsstabilität auch bei Hochtemperaturzyklen (wie in Kernreaktoren oder Brennstoffzellen) und vermeidet Verformungen durch thermische Belastung. Dank ihrer Korrosionsbeständigkeit widersteht die Legierung der Erosion durch Chemikalien in Energieanlagen (wie sauren Elektrolyten oder Hochtemperaturdampf) und verlängert so ihre Lebensdauer. Der optimierte schwache Ferromagnetismus stört das elektromagnetische System von Energieanlagen nicht und eignet sich daher für hochpräzise Steuerungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen** : Komponenten im Energiesektor werden mittels Pulvermetallurgie (Flüssigphasensintern) in Kombination mit heißisostatischem Pressen hergestellt, um eine hohe Dichte und mikrostrukturelle Homogenität zu gewährleisten. Präzisionsbearbeitung (z. B. Funkenerosion oder Laserschneiden) dient der Herstellung komplexer Formen mit Toleranzen im Mikrometerbereich. Die Oberfläche muss poliert oder beschichtet werden, um die Korrosions- und Verschleißfestigkeit zu verbessern. Wärmebehandlung optimiert die mechanischen Eigenschaften, und Oberflächenbeschichtungen (z. B. CVD WC oder PVD TiN ) verbessern die Hochtemperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Die Qualitätskontrolle erfordert die Überprüfung von Dichte, Zusammensetzung und Strahlungsbeständigkeit. Die Zuverlässigkeit der Komponenten wird durch metallografische Analysen, Zugfestigkeitsprüfungen und Strahlungsdämpfungstests sichergestellt.

**Technische Herausforderungen und Optimierung** : In Hochtemperaturumgebungen muss die Oxidationsbeständigkeit und thermische Stabilität der Legierung weiter verbessert werden. Dies kann durch die Optimierung des Nickel-Eisen-Verhältnisses oder das Hinzufügen hochtemperaturbeständiger Beschichtungen erreicht werden. Die Kosten für die Bearbeitung komplexer Teile sind hoch, und der Herstellungsprozess (z. B. additive Fertigung) muss optimiert werden, um die Effizienz zu steigern. Kernenergieanwendungen erfordern eine strenge Kontrolle von Spurenverunreinigungen ( wie Sauerstoff oder Kohlenstoff), um strahlungsbedingte Leistungseinbußen zu vermeiden.

### 5.5.3 Golfschlägergewichte

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen spielen aufgrund ihrer hohen Dichte, hervorragenden mechanischen Eigenschaften und Korrosionsbeständigkeit eine wichtige Rolle bei der Gewichtung von Golfschlägern . Bei Golfschlägern ist eine präzise Massenverteilung das Kernelement zur Optimierung der Schwunghbalance sowie zur Verbesserung der Schlaggenauigkeit und -kontrolle, und Wolfram-Nickel-Eisen- Legierungen können diese Anforderung perfekt erfüllen .

Die hohe Dichte bietet erhebliche Vorteile bei der Bereitstellung von Masse auf begrenztem Raum. Der Golfschlägerkopf hat eine filigrane Struktur, und der Platz im Inneren, der für die Montage des Gegengewichts genutzt werden kann, ist sehr begrenzt. Herkömmliche Materialien erfordern oft ein großes Volumen, um die erforderliche Masse zu erreichen, was das Gesamtdesign und die aerodynamische Leistung des Schlägerkopfes leicht beeinträchtigen kann. Die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung mit ihrer ultrahohen Dichte bietet ausreichend Masse auf kleinem Raum. Dadurch können Designer die Einbauposition des Gegengewichts flexibel anpassen und die Schwerpunktverteilung des Schlägers präzise optimieren. Beispielsweise kann ein kleines Gegengewicht aus einer Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung an der Rückseite des Drivers den Schwerpunkt effektiv nach hinten verlagern, die Schlagtoleranz erhöhen und dem Athleten helfen, auch bei nicht perfektem Schwung eine optimalere Ballbahn zu erzielen. Die Montage des Gegengewichts an der Unterseite des Schlägerkopfes senkt den Schwerpunkt, erhöht die Flugbahn des Schlags und ermöglicht dem Ball eine höhere Flugbahn. Durch die Möglichkeit, den Schwerpunkt flexibel anzupassen, können Sportler auf unterschiedlichen Leistungsniveaus den für ihre Schwungeigenschaften am besten geeigneten Gleichgewichtspunkt finden

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und so die Stabilität und Genauigkeit des Schlags verbessern.

Darüber hinaus gewährleisten die hervorragenden mechanischen Eigenschaften und die Langlebigkeit der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung eine zuverlässige Funktion des Gegengewichts in komplexen Umgebungen. Golf wird überwiegend im Freien gespielt, wobei der Schläger beim Schwung häufig heftigen Stößen, zufälligen Kollisionen mit dem Boden und unterschiedlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt ist. Beim Schwung muss das Gegengewicht enormen Fliehkräften und Drehmomenten standhalten. Bei unzureichender Materialstärke kann es sich leicht verformen, reißen oder sogar abfallen, was sich direkt auf die Leistung und Lebensdauer des Schlägers auswirkt. Die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung zeichnet sich durch hohe Festigkeit und gute Zähigkeit aus und hält diesen dynamischen und mechanischen Belastungen problemlos stand und behält ihre strukturelle Integrität lange Zeit. Selbst bei Regen, nassem Gras und anderen Bedingungen wirkt die hervorragende Korrosionsbeständigkeit dem Erosionseffekt durch korrosive Bestandteile in Wasserdampf und Boden wirksam entgegen, verhindert Rost und Oberflächenablösung des Gegengewichts und sichert so langfristig dessen Qualität und Leistung.

Für Profispieler, die höchste Leistung und hochwertige Golfausrüstung anstreben, sind Gewichte aus Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen unverzichtbar. Profispieler reagieren extrem empfindlich auf kleinste Schwünge, und selbst geringe Qualitätsabweichungen der Gewichte können ihre Leistung beeinträchtigen. Die hohe Dichte von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen ermöglicht eine gramm- oder sogar milligrammgenaue Gewichtsangabe und erfüllt so die Präzisionsanforderungen der Profis. Gleichzeitig sorgt die stabile Leistung dafür, dass die Schläger auch bei langfristigem, hochintensivem Training und Wettkämpfen stets eine konstante Leistung erbringen. So können Sportler ihre Leistung stabilisieren und bessere Ergebnisse auf dem Platz erzielen.

**Anwendungsszenarien** : Gewichte aus Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden häufig in Golfschlägerköpfen (wie Eisen, Hölzern oder Puttern) verwendet, insbesondere in hochwertigen Custom-Schlägern. Sie werden üblicherweise in die Unter- oder Rückseite des Schlägerkopfes eingelassen, um den Schwerpunkt zu optimieren und das Trägheitsmoment (MOI) des Schlägers zu optimieren. Dadurch verbessern sie die Stabilität und Toleranz des Schlags. Bei Eisenschlägern tragen Gewichte zu einem niedrigen Schwerpunkt bei, erhöhen den Abflugwinkel und die Rotationskontrolle des Balls. Bei Puttern verbessern Gewichte die Schwungstabilität und die Puttgenauigkeit. Die Legierung kann auch verwendet werden, um den Schlägerschaft zu beschweren und so das Gleichgewicht zu verbessern.

**Leistungsvorteile** : Die hohe Dichte der Legierung ermöglicht eine effiziente Massenverteilung auf kleinem Raum. Dadurch lässt sich der Schwerpunkt des Schlägers im Vergleich zu herkömmlichen Materialien wie Stahl oder Blei präziser einstellen, wodurch das Schlägerkopfvolumen reduziert und gleichzeitig die Leistung verbessert wird. Die hohe Festigkeit und Zähigkeit gewährleisten, dass sich das Gewicht bei hochfrequenten Schwüngen oder versehentlichen Stößen nicht verformt oder bricht, wodurch die Lebensdauer des Schlägers verlängert wird. Durch die geringe Wärmeausdehnung bleibt das Gewicht bei Temperaturschwankungen im Freien (wie hohen Temperaturen im Sommer oder

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

niedrigen Temperaturen im Winter) formstabil, sodass die Leistung des Schlägers nicht beeinträchtigt wird. Dank ihrer Korrosionsbeständigkeit widersteht die Legierung Erosion durch Grasfeuchtigkeit, Regen oder Reinigungsmittel und ist daher für den langfristigen Einsatz im Freien geeignet. Darüber hinaus ist die Legierung ungiftig und umweltfreundlich und erfüllt die Umweltschutzanforderungen für Golfausrüstung.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen** : Gegengewichte werden mittels Pulvermetallurgie in Kombination mit heißisostatischem Pressen hergestellt, um eine hohe Dichte und mikrostrukturelle Gleichmäßigkeit für eine stabile Massenverteilung zu gewährleisten. Präzisionsbearbeitung (z. B. CNC-Drehen oder -Fräsen) dient der Herstellung komplexer Formen mit Toleranzen im Mikrometerbereich. Die Oberfläche muss hochglanzpoliert werden, um die Ästhetik und die Einbettungsgenauigkeit zu verbessern. Wärmebehandlungen (z. B. Glühen) können Verarbeitungsspannungen eliminieren und die Zähigkeit verbessern. Oberflächenbehandlungen (z. B. Ni-P-Galvanisierung) verbessern die Korrosionsbeständigkeit und das Erscheinungsbild. Die Qualitätskontrolle erfordert die Überprüfung der Dichtekonsistenz, der mechanischen Eigenschaften und der fehlerfreien Struktur sowie eine metallografische Analyse, um die Gleichmäßigkeit und Zuverlässigkeit der Gegengewichte sicherzustellen.

**Technische Herausforderungen und Optimierung** : Hohe Dichte und Härte erschweren die Verarbeitung. Um die Kosten zu senken, sind hochpräzise Geräte und optimierte Schneidparameter erforderlich. Die Mikrostruktur muss streng kontrolliert werden, um Poren oder Einschlüsse zu vermeiden, die die Massenverteilung beeinträchtigen. Form und Position des Gegengewichtsblocks müssen präzise auf verschiedene Schlägertypen abgestimmt sein, und die Schwerpunktverteilung kann durch Computersimulation optimiert werden. Additive Fertigungstechnologien (wie SLM) ermöglichen zukünftig die Herstellung maßgeschneiderter Gegengewichtsblöcke, um individuelle Anforderungen zu erfüllen und die Produktionseffizienz zu verbessern.

#### 5.5.4 Rennmotor-Auswuchtsatz

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden als Ausgleichskomponenten in Rennmotoren eingesetzt, um die dynamische Balance der Kurbelwelle oder des Schwungrads zu optimieren, Vibrationen zu reduzieren und die Motorleistung und -haltbarkeit zu verbessern. Rennmotoren (wie F1-Fahrzeuge oder Le-Mans-Langstreckenrennwagen) müssen bei hohen Drehzahlen (bis zu Zehntausenden Umdrehungen pro Minute) und extremen Bedingungen laufen und stellen extrem hohe Anforderungen an die Schwingungskontrolle und Massenverteilung.

Aufgrund ihrer hohen Dichte und mechanischen Eigenschaften eignen sich Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen ideal als Werkstoff für Ausgleichskomponenten, da sie bei intensiven Bewegungen die strukturelle Stabilität aufrechterhalten, Vibrationen wirksam unterdrücken, die Leistungsabgabe verbessern und die Lebensdauer des Motors verlängern können.

**Anwendungsszenarien** : Ausgleichskomponenten aus Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden in

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kurbelwellen-, Schwungrad- und Kolbensystemen von Rennmotoren eingesetzt, um die Massenverteilung rotierender Teile zu optimieren und ungleichmäßige Vibrationen bei hohen Drehzahlen zu reduzieren. Bei F1-Rennmotoren werden Ausgleichsblöcke aus Legierung in die Kurbelwelle oder das Schwungrad eingebettet, um die Rotationsträgheit zu korrigieren und einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten. Bei Langstreckenrennwagen verbessern Ausgleichskomponenten die Langzeitstabilität des Motors und reduzieren vibrationsbedingte Ermüdungsschäden an anderen Komponenten (wie dem Getriebe). Die Legierung kann auch in den Gegengewichtskomponenten von Turboladern eingesetzt werden, um die dynamische Balance der Turbinenschaufeln zu optimieren.

**Leistungsvorteile :** Die hohe Dichte der Legierung ermöglicht ausreichend Masse auf kleinem Raum, die präzise Unwucht von Kurbelwelle oder Schwungrad, die deutliche Reduzierung der Schwingungsamplitude bei hohen Drehzahlen, den Energieverlust und die Leistungssteigerung. Ihre hohe Festigkeit und Zähigkeit gewährleisten, dass sich die Unwuchtkomponenten bei hochfrequenter Rotation und mechanischer Belastung nicht verformen oder brechen, was den extremen Betriebsbedingungen von Rennmotoren gerecht wird. Die geringe Wärmeausdehnung ermöglicht den Komponenten, ihre Dimensionsstabilität auch in der Hochtemperaturumgebung des Motors (z. B. in Hochtemperatur-Brennkammern) zu bewahren und so thermisch bedingte Unwuchten zu vermeiden. Die Korrosionsbeständigkeit der Legierung macht sie widerstandsfähig gegen chemische Erosion durch Kraftstoff, Schmieröl oder Hochtemperatur-Abgase und verlängert so ihre Lebensdauer.

**Verarbeitungs- und Qualitätsanforderungen :** Ausgewuchtete Komponenten werden mittels Pulvermetallurgie in Kombination mit heißisostatischem Pressen hergestellt, um eine hohe Dichte und eine gleichmäßige Mikrostruktur zu gewährleisten und so eine hervorragende dynamische Auswuchtleistung zu erzielen. Mittels Ultrapräzisionsbearbeitung (z. B. 5-achsige CNC-Bearbeitung oder Laserschneiden) werden komplexe Formen mit Toleranzen im Submikrometerbereich und hochglanzpolierten Oberflächen hergestellt, um Reibung und Schwingungsverstärkung zu reduzieren. Wärmebehandlung optimiert die mechanischen Eigenschaften, und Oberflächenbeschichtungen (z. B. DLC oder TiN) erhöhen die Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit. Die Qualitätskontrolle erfordert die Überprüfung der Dichtkonsistenz, der mechanischen Eigenschaften und der porenfreien Struktur sowie Schwingungstests und Spektralanalysen, um die Komponentenstabilität bei hohen Geschwindigkeiten sicherzustellen.

**Technische Herausforderungen und Optimierung :** Die Bearbeitung hochpräziser Auswuchtkomponenten ist kostenintensiv, und der Prozess muss optimiert werden, um die Effizienz zu steigern. Die Mikrostruktur muss fehlerfrei sein, um Schwingungsverstärkungen zu vermeiden, und die Sinter- und Wärmebehandlungsparameter müssen streng kontrolliert werden. Die magnetischen Eigenschaften der Legierung müssen optimiert werden, um der geringen Toleranz des Motors gegenüber elektromagnetischen Störungen gerecht zu werden. Dies kann durch eine Anpassung der Formel oder eine nichtmagnetische Oberflächenbehandlung erreicht werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**CTIA GROUP LTD**  
**Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction**

**1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy**

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

**2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy**

**High Density:** Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm<sup>3</sup>.

**High Strength:** Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

**Other Characteristics:** Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

**3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades**

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
<b>Composition (%)</b>	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
<b>Density (g/cm<sup>3</sup>)</b>	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
<b>Heat Treatment</b>	Sintering						
<b>Tensile Strength (PSI)</b>	900~1000		900~1100		920~1100		
<b>Elongation (%)</b>	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
<b>Hardness (HRC)</b>	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

**4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy**

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

**4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy**

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

**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)

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Kapitel 6 Vorteile und Nachteile von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen

### 6.1 Analyse der Vorteile der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen haben sich in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin, in der Präzisionsinstrumentierung und anderen Bereichen als vielseitig einsetzbar erwiesen. Die Legierung vereint die hohe Dichte und den hohen Schmelzpunkt von Wolfram mit der Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit von Nickel und Eisen und bietet dadurch erhebliche Vorteile in verschiedenen Hochleistungsanwendungen. Insbesondere ihre hohe Dichte und Festigkeit sowie die guten Verarbeitungseigenschaften machen sie zu einem idealen Werkstoff für viele Schlüsselkomponenten. Im Folgenden werden die Vorteile der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung hinsichtlich hoher Dichte, Festigkeit und Verarbeitungseigenschaften detailliert analysiert.

#### 6.1.1 Hohe Dichte und Festigkeit

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen haben sich aufgrund ihrer hohen Dichte und hervorragenden mechanischen Eigenschaften zum bevorzugten Material für viele anspruchsvolle Anwendungen entwickelt. Die hohe Ordnungszahl und Dichte von Wolfram, kombiniert mit der Verstärkung durch Nickel und Eisen, verleihen der Legierung eine hohe Leistung in Anwendungsbereichen, die eine hohe Massenverteilung, hohe Festigkeit und Haltbarkeit erfordern. Sie eignen sich insbesondere für Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt, militärische panzerbrechende Kerne und medizinische Abschirmteile.

**Vorteile :** Die hohe Dichte der Legierung ermöglicht eine erhebliche Masse auf kleinem Raum, was herkömmlichen Materialien wie Blei oder Stahl überlegen ist. In der Luft- und Raumfahrt beispielsweise müssen Gegengewichte eine präzise Schwerpunkteinstellung auf begrenztem Raum ermöglichen. Die hohe Dichte der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung verkleinert die Komponente, reduziert das Gesamtgewicht der Ausrüstung und erhöht die Designflexibilität. Im militärischen Bereich verleiht die hohe Dichte der Legierung dem panzerbrechenden Kern eine extrem hohe kinetische Durchschlagskraft, wodurch gepanzerte Ziele effektiv bekämpft werden können. Ihre hohe Festigkeit gewährleistet die strukturelle Integrität der Legierung auch in stark beanspruchten Umgebungen, wie z. B. bei schnell rotierenden Motorteilen oder bei Stoßbelastungen. Die Legierung hält Vibrationen und mechanischen Belastungen stand, ohne zu brechen oder sich zu verformen. Die moderate Zähigkeit macht die Legierung weniger spröde bei Stößen, erhöht die Ermüdungsbeständigkeit der Komponenten und eignet sich für den Langzeiteinsatz in rauen Umgebungen. Die geringe Wärmeausdehnung der Legierung gewährleistet zudem ihre Dimensionsstabilität bei Temperaturschwankungen und verhindert Verformungen durch thermische Belastung, was insbesondere in Umgebungen mit hohen oder niedrigen Temperaturen wichtig ist.

**Anwendungswert :** Die Kombination aus hoher Dichte und Festigkeit macht Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in einer Vielzahl von Szenarien unersetzlich. In Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt optimiert die Legierung die Balance und Stabilität von Flugzeugen; im medizinischen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Strahlenschutz absorbiert ihre hohe Dichte effizient Röntgen- und Gammastrahlen; in militärischen panzerbrechenden Kernen sorgen Festigkeit und Dichte der Legierung für hohe Durchdringung und Zuverlässigkeit. Dank dieser Eigenschaften erfüllt die Legierung die hohen Materialanforderungen von Hochleistungsanwendungen.

**Technische Unterstützung** : Hohe Dichte und Festigkeit werden durch Pulvermetallurgie und Flüssigphasensintern erreicht . Durch präzise Steuerung des Wolfram-, Nickel- und Eisenverhältnisses sowie der Sinterbedingungen erreicht die Legierung eine hohe Dichte und eine gleichmäßige Mikrostruktur. Heißisostatisches Pressen beseitigt zusätzlich Porosität und verbessert Festigkeit und Zähigkeit. Die Qualitätskontrolle erfolgt durch Zugversuche, metallografische Analysen und andere Methoden, um sicherzustellen, dass die Legierung den Luft- und Raumfahrt- oder Militärstandards entspricht.

### 6.1.2 Verarbeitungsleistung

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen bieten einen weiteren wichtigen Vorteil. Obwohl Wolfram selbst eine hohe Härte aufweist und schwer zu verarbeiten ist, verbessert die Zugabe von Nickel und Eisen die Bearbeitbarkeit der Legierung deutlich und ermöglicht die Herstellung komplexer Teile durch vielfältige Verfahren. Im Vergleich zu reinem Wolfram lassen sich Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen besser in der Bearbeitung, Formgebung und Oberflächenbehandlung verarbeiten und erfüllen so die Anforderungen der Präzisionsfertigung.

**Vorteile** : Nickel und Eisen wirken als Bindephasen, die die Gesamthärte der Legierung reduzieren und ihre Formbarkeit durch konventionelle Bearbeitungsverfahren wie Drehen, Fräsen, Bohren und Schleifen ermöglichen. Die moderate Zähigkeit der Legierung reduziert das Risiko von Rissbildung während der Verarbeitung und eignet sich für die Herstellung hochpräziser Teile, wie beispielsweise Kollimatoren für medizinische Geräte oder Gegengewichte für Präzisionsinstrumente. Das Flüssigphasensinterverfahren verleiht der Legierung nach dem Sintern eine hohe Dichte und eine gleichmäßige Mikrostruktur, was die nachfolgende Verarbeitung zur Erreichung mikrometeregenauer Toleranzen erleichtert. Die Legierung eignet sich zudem für Funkenerosion (EDM) und Laserschneiden und eignet sich für die Herstellung komplexer Geometrien, wie beispielsweise Ausgleichsblöcke für Lithografiemaschinen oder Gegengewichte für chirurgische Roboter. Darüber hinaus weist die Legierung eine hervorragende Oberflächenbehandlung auf und kann poliert, chemisch vernickelt oder PVD-beschichtet werden, um die Korrosionsbeständigkeit und Ästhetik zu verbessern und so den hohen Anforderungen der Medizin- und Präzisionsinstrumentenbranche gerecht zu werden. Wärmebehandlungen (z. B. Glühen) können die Verarbeitungseigenschaften weiter optimieren, innere Spannungen eliminieren, die Zähigkeit verbessern und die Endbearbeitung der Legierung erleichtern.

**Anwendungswert** : Dank ihrer guten Verarbeitungseigenschaften erfüllt die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung vielfältige Fertigungsanforderungen. Im medizinischen Bereich kann die Legierung zu Schildern oder Kollimatoren mit komplexen Formen, hoher Präzision und glatter Oberfläche verarbeitet werden. In der Luft- und Raumfahrt können aus der Legierung hochpräzise Gegengewichte hergestellt

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

werden, um die Leistung von Flugzeugen zu optimieren. In Präzisionsinstrumenten kann die Legierung zu Mikrodämpfungsblöcken oder Ausgleichskomponenten verarbeitet werden, um Präzisionsanforderungen im Submikrometerbereich zu erfüllen. Diese Eigenschaften machen die Legierung in Hightech-Bereichen vielseitig einsetzbar.

**Technische Unterstützung** : Eine verbesserte Verarbeitungsleistung beruht auf der Optimierung pulvermetallurgischer Prozesse, wie beispielsweise der präzisen Kontrolle von Sinter Temperatur und -atmosphäre zur Reduzierung von Porosität und Einschlüssen. Heißisostatisches Pressen und Wärmebehandlungsverfahren verbessern die Bearbeitbarkeit der Legierung zusätzlich. Moderne Verarbeitungsanlagen gewährleisten hohe Präzision und Oberflächenqualität.

## 6.2 Einschränkungen der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

Obwohl Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen aufgrund ihrer hohen Dichte, hervorragenden mechanischen Eigenschaften und Korrosionsbeständigkeit in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin und in der Präzisionsinstrumententechnik weit verbreitet sind, unterliegen sie auch einigen Einschränkungen, die ihren Einsatz in bestimmten Anwendungsbereichen einschränken. Kosten- und Ressourcenbeschränkungen sowie Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen sind die beiden Haupteinschränkungen von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen, die die Nachhaltigkeit ihrer Produktion, Verarbeitung und breiten Anwendung beeinträchtigen. Im Folgenden werden diese Einschränkungen und ihre Auswirkungen auf die Anwendung detailliert analysiert.

### 6.2.1 Kosten- und Ressourcenbeschränkungen

Die Einsatzmöglichkeiten von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sind hoch und werden durch die Rohstoffknappheit begrenzt, was ihre breite Anwendung in bestimmten Bereichen teilweise einschränkt. Da es sich um ein seltenes Metall handelt, sind Abbau, Raffination und Verarbeitung von Wolfram komplex und energieintensiv. Dadurch sind die Gesamtkosten von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen höher als bei herkömmlichen Materialien wie Stahl oder Aluminium, was für kostensensitive Anwendungsszenarien eine Herausforderung darstellt.

**Einschränkungen** : Die Knappheit der Wolframressourcen ist der Hauptkostentreiber. Die Wolframvorräte sind weltweit begrenzt und hauptsächlich in wenigen Ländern konzentriert. Instabile Lieferketten können zu Preisschwankungen führen. Die hochreine Raffination von Wolfram erfordert zahlreiche chemische und metallurgische Prozesse, was die Rohstoffkosten erhöht. Obwohl Nickel und Eisen häufiger vorkommen, erhöhen hohe Reinheitsanforderungen (insbesondere für Anwendungen in der Medizin und der Luft- und Raumfahrt) die Materialkosten zusätzlich. Während des Produktionsprozesses erfordern Pulvermetallurgie (Flüssigphasensintern) und Heißisostatisches Pressen (HIP) Hochtemperatur- und Hochdruckanlagen, die viel Energie verbrauchen und hohe Wartungskosten verursachen. Die Präzisionsbearbeitung (z. B. 5-achsige CNC-Bearbeitung oder EDM) erfordert aufgrund der hohen Härte der Legierung hochverschleißfeste Werkzeuge (z. B. CBN- oder Diamantwerkzeuge), was zu einer geringen Bearbeitungseffizienz und schnellem Werkzeugverschleiß

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

führt und somit zu erhöhten Bearbeitungskosten führt. Obwohl neue Technologien wie der 3D-Druck die Designflexibilität verbessert haben, schränken die hohen Kosten für spezielle Legierungspulver und Anlagen die großtechnische Anwendung ein. Strenge Qualitätskontrollanforderungen (wie XRF, SEM-EDS-Analyse) erhöhen die Produktionskosten zusätzlich. Diese Faktoren machen Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in kostensensiblen Bereichen (wie Konsumgütern oder einfachen Industrieanwendungen) weniger wettbewerbsfähig.

**Auswirkungen auf die Anwendung** : Hohe Kosten schränken den Einsatz von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in Low-Budget-Projekten ein. Beispielsweise können in einigen zivilen Bereichen (wie dem allgemeinen Maschinenbau) günstigere Materialien wie Blei oder Stahl bevorzugt werden, obwohl die Leistung nicht an die der Legierung heranreicht. In der Luft- und Raumfahrt sowie im Militärbereich stehen zwar hohe Leistungsanforderungen im Vordergrund, die Kostenkontrolle ist jedoch weiterhin ein wichtiger Aspekt bei der Projektplanung. Ressourcenbeschränkungen können zudem zu Lieferkettenrisiken führen, insbesondere bei Einschränkungen des internationalen Handels oder geopolitischen Spannungen, die die stabile Versorgung mit Legierungen beeinträchtigen.

**Verbesserungsrichtung** : Um Kosten zu senken, kann der Wolframerz-Raffinationsprozess optimiert werden, um die Ressourcennutzung zu verbessern, beispielsweise durch den Einsatz effizienterer Aufbereitungstechnologien oder das Recycling von Altlegierungen. Verbesserte Pulveraufbereitungs- und Sinterprozesse (z. B. Niedertemperatursintern) können den Energieverbrauch senken. Die Entwicklung effizienterer Verarbeitungstechnologien (z. B. Optimierung der additiven Fertigung) oder alternativer Werkzeugmaterialien kann die Verarbeitungskosten senken. Eine Diversifizierung der Lieferkette (z. B. durch die Erschließung neuer Mineralquellen oder internationale Kooperationen) kann dazu beitragen, Ressourcenengpässe zu verringern und eine stabile Rohstoffversorgung sicherzustellen.

### 6.2.2 Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit

Die Herstellung und Verwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen hat gewisse Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit. Obwohl sie ungiftig und besser als herkömmliche Materialien wie Blei sind, müssen in einigen Bereichen dennoch potenzielle Risiken beachtet werden. Der Abbau, die Verarbeitung und die Entsorgung von Wolfram, Nickel und Eisen können Auswirkungen auf die Umwelt haben. Auch die potenziellen Gesundheitsrisiken von Nickel müssen streng kontrolliert werden, um die Sicherheit der Legierung im medizinischen und zivilen Bereich zu gewährleisten.

**Einschränkungen** : Der Abbau und die Raffination von Wolfram haben erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt, darunter Landzerstörung, Wasserverschmutzung und Energieverbrauch. Bei der Wolframaufbereitung werden häufig chemische Reagenzien (wie Flotationsmittel) eingesetzt, die Abwässer und Rückstände erzeugen können. Bei unsachgemäßer Handhabung verschmutzen sie Boden und Wasserquellen. Pulvermetallurgie und heißisostatisches Pressen erfordern hohe Temperaturen und hohen Druck, verbrauchen viel Energie, erzeugen CO<sub>2</sub>-Emissionen und erhöhen die Umweltbelastung. Kühlschmierstoffe und Polierabfälle im Verarbeitungsprozess können bei unsachgemäßer Handhabung Schadstoffe freisetzen. Nickel als Legierungsbestandteil birgt potenzielle Sensibilisierungs- und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Toxizitätsrisiken. Insbesondere im medizinischen Bereich kann Langzeitkontakt oder Implantation Hautallergien oder Gewebereaktionen auslösen, obwohl Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen insgesamt eine gute Biokompatibilität aufweisen. Darüber hinaus kann der schwache Ferromagnetismus der Legierung in hochsensiblen elektromagnetischen Umgebungen (wie z. B. MRT-Geräten) leichte Störungen verursachen, die durch eine Optimierung der Formel oder Oberflächenbehandlung behoben werden müssen. Das Recycling und die Behandlung von Legierungsabfällen erfordert spezielle Verfahren und eine unsachgemäße Entsorgung kann zu Ressourcenverschwendung oder Umweltverschmutzung führen.

**Auswirkungen auf die Anwendung** : Umweltauswirkungen erschweren den Einsatz von Legierungen in Branchen mit strengen Umweltauflagen (wie Medizin oder Ökostrom). Hoher Energieverbrauch und hohe Entsorgungskosten im Produktionsprozess können die Gesamtkosten erhöhen und die Marktwettbewerbsfähigkeit beeinträchtigen. Die potenziellen Gesundheitsrisiken von Nickel erfordern strenge Biokompatibilitätstests für medizinische Anwendungen (wie Implantate oder chirurgische Instrumente), was die Entwicklungszyklen und -kosten verlängert. In hochempfindlichen Präzisionsinstrumenten muss der Magnetismus der Legierung speziell kontrolliert werden, was ihre Verwendung in bestimmten Szenarien mit hohen Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit einschränken kann. Unzulängliches Abfallmanagement kann regulatorische Probleme verursachen, insbesondere in Gebieten mit strengen Umweltauflagen.

**Verbesserungsrichtung** : Um die Umweltbelastung zu reduzieren, können umweltfreundliche Mineralverarbeitungstechnologien (z. B. ungiftige Flotationsmittel) und geschlossene Wasseraufbereitungssysteme eingesetzt werden. Optimierte Sinter- und Wärmebehandlungsprozesse (z. B. durch den Einsatz erneuerbarer Energien) können den CO<sub>2</sub>-Ausstoß senken. Die Entwicklung effizienter Recyclingtechnologien zur Förderung des Recyclings von Legierungsschrott kann Ressourcenverschwendung und Umweltbelastung reduzieren. Aus gesundheitlicher Sicht kann das potenzielle Allergierisiko durch die Reduzierung des Nickelgehalts oder den Einsatz biokompatibler Beschichtungen (z. B. DLC oder TiN) verringert werden, um die Sicherheit medizinischer Anwendungen zu gewährleisten. Bei magnetischen Problemen kann die Legierungsformel optimiert werden (z. B. durch Reduzierung des Eisengehalts) oder es können nichtmagnetische Oberflächenbehandlungstechnologien entwickelt werden, um den Anforderungen hochempfindlicher Geräte gerecht zu werden. Grüne Fertigungstechnologien und strenge Umweltschutzstandards werden die nachhaltige Entwicklung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen künftig weiter fördern.

### 6.3 Vergleich zwischen WNiFe -Legierung und anderen Materialien

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften und ihrer Korrosionsbeständigkeit häufig in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin und in Präzisionsinstrumenten eingesetzt. Im Vergleich zu anderen hochdichten Werkstoffen weisen Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen jedoch Vor- und Nachteile hinsichtlich Leistung, Verarbeitbarkeit und Kosten auf. Um ihre Anwendbarkeit umfassend beurteilen zu können, ist ein Vergleich mit Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen, bleibasierten Legierungen und anderen hochdichten

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Werkstoffen erforderlich, um deren jeweilige Eigenschaften und Anwendungsszenarien zu analysieren. Im Folgenden wird der Vergleich zwischen Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen und diesen Werkstoffen detailliert erläutert.

### 6.3.1 Vergleich mit Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung

Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen sind eine weitere hochdichte Legierung, ähnlich wie Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Sie werden häufig in ähnlichen Anwendungsszenarien eingesetzt, beispielsweise für Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt, medizinische Abschirmteile und Komponenten von Präzisionsinstrumenten. Beide verwenden Wolfram als Hauptbestandteil, ergänzt durch Nickel und Kupfer (oder Eisen) als Bindephase. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften von Kupfer und Eisen weist die Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung jedoch in einigen Eigenschaften erhebliche Unterschiede zur Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung auf.

**Leistungsvergleich :** Die Dichte der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ( $16,5\text{--}18,75\text{ g/cm}^3$ ) ist mit der der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung ( $16,5\text{--}18,5\text{ g/cm}^3$ ) vergleichbar. Beide Legierungen eignen sich für hochdichte Gegengewichte und Abschirmungen. Die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung verfügt über hervorragende mechanische Eigenschaften, eine hohe Zugfestigkeit ( $800\text{--}1000\text{ MPa}$ ) und Zähigkeit (Dehnung  $10\text{--}20\%$ ) und eignet sich für Anwendungen mit hoher Beanspruchung oder Stoßbelastung, wie z. B. für militärische panzerbrechende Projektilkerne. Die Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung weist etwas geringere Festigkeit und Zähigkeit auf (Zugfestigkeit  $700\text{--}900\text{ MPa}$ , Dehnung  $5\text{--}15\%$ ). Aufgrund ihrer nichtmagnetischen Eigenschaften (Kupfer ist paramagnetisch) ist sie jedoch in Anwendungen mit hohen Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit (z. B. MRT-Geräte) vorteilhafter. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen weisen aufgrund des Eisenzusatzes einen schwachen Ferromagnetismus auf, der in elektromagnetisch hochempfindlichen Umgebungen leichte Störungen verursachen kann. Die Wärmeleitfähigkeit von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen ( $120\text{--}150\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) ist etwas höher als die von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen ( $100\text{--}130\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) und eignet sich für Anwendungen, die eine schnelle Wärmeableitung erfordern. Aufgrund der Oxidationsbeständigkeit von Nickel ist die Korrosionsbeständigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in feuchten oder chemischen Umgebungen gut, während der Kupferanteil der Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung in bestimmten sauren Umgebungen leichte Korrosion verursachen kann.

**Verarbeitung und Kosten :** Die Verarbeitungseigenschaften von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sind besser. Die Bindungsphase von Nickel und Eisen reduziert die Gesamthärte, was sich für Dreh-, Fräs- und Funkenerosion eignet. Die Bearbeitbarkeit von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen ist etwas schlechter. Aufgrund der höheren Duktilität von Kupfer kann es zu Verklebungen oder Graten auf der bearbeiteten Oberfläche kommen, was eine präzisere Verarbeitungstechnologie erfordert. Eisen ist günstiger und häufiger als Kupfer, wodurch die Rohstoffkosten für Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen niedriger sind. Die Kosten für Verarbeitung und Qualitätskontrolle sind jedoch ähnlich. Die nichtmagnetische Natur von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen macht sie für einige Spezialanwendungen wettbewerbsfähiger, Schwankungen des Kupferpreises können jedoch die Kosten erhöhen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Anwendungsszenarien** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen eignen sich für Anwendungen, die hohe Festigkeit und Zähigkeit erfordern, wie z. B. Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt, militärische Panzerkerne und medizinische Kollimatoren. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen eignen sich besser für elektromagnetisch empfindliche Umgebungen, wie z. B. MRT-Abschirmungen oder Gegengewichte für Präzisionsinstrumente, und ihre nichtmagnetische Beschaffenheit verhindert Störungen. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden häufiger im Militärbereich eingesetzt, während Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen häufiger in der Medizin und Elektronik verwendet werden.

**Zusammenfassung der Vor- und Nachteile** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen bieten Vorteile hinsichtlich Festigkeit, Zähigkeit und Kosten und eignen sich für Anwendungen mit hoher Beanspruchung. Ihr schwacher Ferromagnetismus kann jedoch ihren Einsatz in elektromagnetisch empfindlichen Bereichen einschränken. Die nichtmagnetische Natur und die höhere Wärmeleitfähigkeit von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen machen sie in bestimmten Bereichen vorteilhafter, ihre Festigkeit ist jedoch etwas geringer und ihre Kosten höher.

### 6.3.2 Vergleich mit bleibasierten Legierungen

Bleibasierte Legierungen werden aufgrund ihrer hohen Dichte und niedrigen Kosten seit langem für Gegengewichte, Abschirmungen und bestimmte industrielle Anwendungen eingesetzt. Im Vergleich zu Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen weisen bleibasierte Legierungen jedoch erhebliche Nachteile hinsichtlich Leistung und Umweltfreundlichkeit auf, insbesondere in anspruchsvollen Bereichen wie der Medizin und der Luft- und Raumfahrt.

**Leistungsvergleich** : Die Dichte bleibasierter Legierungen ( $11,34 \text{ g/cm}^3$ ) ist deutlich geringer als die von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen ( $16,5\text{--}18,75 \text{ g/cm}^3$ ). Für das gleiche Gegengewicht bzw. die gleiche Abschirmwirkung ist daher ein größeres Volumen erforderlich, was für kompaktes Design ungeeignet ist. Die Zugfestigkeit ( $800\text{--}1000 \text{ MPa}$ ) und Zähigkeit (Dehnung  $10\text{--}20 \%$ ) von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen übertreffen die von bleibasierten Legierungen (Zugfestigkeit  $< 50 \text{ MPa}$ , geringe Zähigkeit) deutlich. Dadurch halten sie hohen Belastungen und Stößen stand und eignen sich für militärische Panzerkerne oder Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt. Die geringe Festigkeit und Sprödigkeit bleibasierter Legierungen machen sie anfällig für Verformungen und Brüche, was ihre Anwendung in dynamischen Umgebungen einschränkt. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen ( $4,5\text{--}5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) ist besser als der von bleibasierten Legierungen (ca.  $29 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) und sie bleiben bei Temperaturschwankungen formstabil. Hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit profitieren Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen von der Oxidationsbeständigkeit von Nickel und übertreffen bleibasierte Legierungen, die in feuchten oder sauren Umgebungen korrosionsanfällig sind, deutlich. Hinsichtlich der Strahlenabschirmung sind Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen aufgrund der hohen Ordnungszahl von Wolfram ( $Z=74$ ) Blei ( $Z=82$ ) bei der Absorption von Röntgen- und Gammastrahlen überlegen, insbesondere in Umgebungen mit hochenergetischer Strahlung.

**Verarbeitung und Kosten** : Aufgrund ihrer geringen Härte sind bleibasierte Legierungen leicht zu

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verarbeiten. Sie können durch Gießen oder einfache mechanische Bearbeitung hergestellt werden und sind deutlich kostengünstiger als Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen müssen pulvermetallurgisch, heißisostatisch gepresst und durch Präzisionsbearbeitung (z. B. CNC oder EDM) hergestellt werden. Die Verarbeitungskosten sind zwar hoch, aber komplexe Formen und hohe Präzision (Toleranz  $\pm 0,01$  mm) sind erreichbar. Bleibasierte Legierungen weisen eine geringe Verarbeitungsgenauigkeit und eine schlechte Oberflächenqualität auf und sind daher für hochpräzise Anwendungen ungeeignet. Aus Umweltschutzgründen ist Blei aufgrund seiner Toxizität im medizinischen und zivilen Bereich strengstens verboten (z. B. durch die RoHS-Richtlinie). Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen hingegen sind ungiftig und umweltfreundlich und erfüllen moderne Sicherheitsstandards.

**Anwendungsszenarien** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden häufig in medizinischen Abschirmteilen, Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt sowie in militärischen Komponenten eingesetzt, um hohe Leistungs- und Umweltschutzanforderungen zu erfüllen. Bleibasierte Legierungen werden hauptsächlich in kostengünstigen und anspruchslosen Anwendungen eingesetzt, beispielsweise in industriellen Gegengewichten oder nicht präzisen Abschirmungen. Aufgrund von Umweltvorschriften wird ihre Anwendung jedoch schrittweise reduziert.

**Zusammenfassung der Vor- und Nachteile** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen übertreffen bleibasierte Legierungen in Dichte, Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Umweltschutz deutlich und eignen sich für Hochleistungsanwendungen, sind aber relativ teuer. Bleibasierte Legierungen sind kostengünstig und einfach zu verarbeiten, weisen jedoch unzureichende Leistung und Umweltschutz auf und werden zunehmend durch Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen ersetzt.

### 6.3.3 Vergleich mit anderen hochdichten Werkstoffen

Neben WNiCu- und Pb-basierten Legierungen muss WNiFe auch mit anderen hochdichten Werkstoffen wie W-basierten Verbundwerkstoffen, Uranlegierungen und hochdichten Keramiken verglichen werden, um ihre Wettbewerbsfähigkeit in spezifischen Anwendungen zu beurteilen. Diese Werkstoffe weisen hinsichtlich Dichte, Leistung und Kosten jeweils eigene Eigenschaften auf.

**Leistungsvergleich** : Wolframbasierte Verbundwerkstoffe (wie Wolfram-Polymer-Verbundwerkstoffe) haben eine geringere Dichte ( $10\text{--}15$  g/cm<sup>3</sup>) als Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen ( $16,5\text{--}18,75$  g/cm<sup>3</sup>) und ihre Abschirm- und Gegengewichtswirkung ist schwächer.

Sie sind jedoch leicht und eignen sich für Anwendungen, die keine hohe Dichte erfordern. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen weisen eine höhere Festigkeit ( $800\text{--}1000$  MPa) und Zähigkeit als Wolfram-Polymer-Verbundwerkstoffe auf und eignen sich für Anwendungen mit hoher Beanspruchung. Uranlegierungen mit abgereichertem Uran (Dichte ca.  $19$  g/cm<sup>3</sup>) haben eine etwas höhere Dichte als Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen, besitzen eine hohe Durchdringungskraft und werden häufig in militärischen Panzerungskernen eingesetzt. Ihre Radioaktivität und Toxizität schränken ihre Anwendung jedoch stark ein, und die Verarbeitung erfordert besonderen Schutz.

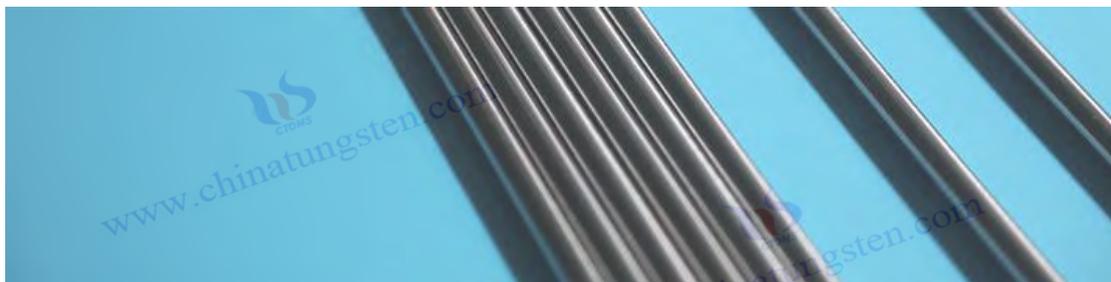
#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sind nicht radioaktiv und für den medizinischen und zivilen Bereich geeignet. Hochdichte Keramiken (wie Wolframkarbid, Dichte ca.  $15,6 \text{ g/cm}^3$ ) haben eine extrem hohe Härte, aber eine geringe Zähigkeit und neigen zu Sprödbbruch, weshalb sie sich eher für verschleißfeste Beschichtungen denn als Hauptkomponenten eignen. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen haben eine bessere Zähigkeit (Dehnung 10–20 %) und Verarbeitbarkeit als Keramiken und eignen sich für Teile mit komplexen Formen. In puncto Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit sind Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen ( $100\text{--}130 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$ ) Wolfram-Polymer-Verbundwerkstoffen und Keramiken überlegen, bei hohen Temperaturen jedoch reinem Wolfram ( $173 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$ ) etwas unterlegen.

**Verarbeitung und Kosten** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden durch Pulvermetallurgie und Präzisionsbearbeitung hergestellt. Die Verarbeitungskosten sind höher als bei Wolfram-Polymer-Verbundwerkstoffen (kann im Spritzgussverfahren hergestellt werden), jedoch niedriger als bei reinem Wolfram (hohe Härte und schwierige Verarbeitung). Die Verarbeitung von Uranlegierungen erfordert spezielle Ausrüstung und Schutzmaßnahmen, und die Kosten- und Sicherheitsrisiken sind extrem hoch. Das Sintern und die Verarbeitung von hochdichter Keramik (z. B. Diamantschleifen) sind teuer und in der Formgebung begrenzt. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen zeichnen sich durch gute Verarbeitungseigenschaften aus, eignen sich zum Drehen, Fräsen und 3D-Drucken und eignen sich für die Herstellung komplexer Teile.

**Anwendungsszenarien** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen eignen sich für Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt, medizinische Abschirmungen und militärische Komponenten, wobei Leistung und Verarbeitbarkeit gleichermaßen berücksichtigt werden. Wolfram-Polymer-Verbundwerkstoffe werden für leichte Abschirmungen oder Anwendungen mit geringer Belastung eingesetzt, Uranlegierungen sind auf spezielle militärische Anwendungen beschränkt und hochdichte Keramiken werden für verschleißfeste Beschichtungen oder Werkzeuge verwendet. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen bieten ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Leistung, Umweltschutz und Verarbeitbarkeit und bieten ein breiteres Anwendungsspektrum.

**Zusammenfassung der Vor- und Nachteile** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sind Wolfram-Polymer-Verbundwerkstoffen und Keramik in Dichte, Festigkeit und Verarbeitbarkeit überlegen und umweltfreundlicher als Uranlegierungen. In bestimmten Fällen (z. B. bei extremer Verschleißfestigkeit oder ultrahoher Dichte) können sie jedoch durch andere Materialien ersetzt werden. Die umfassende Leistung macht sie im Hochleistungsbereich wettbewerbsfähiger.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Kapitel 7 Auswirkungen der Produktion und Verwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen auf die Umwelt

### 7.1 Umweltauswirkungen während der Produktion

Die Herstellung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen umfasst mehrere Schritte wie Rohstoffabbau, Raffination, Pulvermetallurgie, Verarbeitung und Oberflächenbehandlung, die sich auf die Umwelt auswirken. Obwohl Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen gegenüber herkömmlichen Materialien wie bleibasierten Legierungen Umweltvorteile bieten, sind mit ihrem Herstellungsprozess dennoch Umweltprobleme wie Ressourcenverbrauch, Energieverbrauch und Abfallemissionen verbunden, die sich potenziell auf Boden, Wasser und Atmosphäre auswirken können. Aufgrund der Nachfrage nach Hochleistungsanwendungen (wie Luft- und Raumfahrt, Militär, Medizin und Präzisionsinstrumenten) ist die Optimierung von Produktionsprozessen zur Reduzierung der Umweltbelastung in den Fokus der Industrie gerückt. Im Folgenden werden die Umweltauswirkungen der Herstellung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen hinsichtlich Ressourcenabbau und Energieverbrauch sowie Abfall und Emissionen detailliert analysiert.

#### 7.1.1 Rohstoffgewinnung und Energieverbrauch

Die Herstellung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen basiert auf dem Abbau und der Raffination von Metallen wie Wolfram, Nickel und Eisen. Diese Prozesse verbrauchen viel Ressourcen und Energie und gehen mit potenziellen Umweltauswirkungen einher. Da es sich um ein seltenes Metall handelt, ist der Abbau und die Verarbeitung von Wolfram komplex und energieintensiv. Der Abbau von Nickel und Eisen ist zudem mit Umweltstörungen verbunden, die zu Landschäden und Veränderungen der Ökosysteme führen.

**Umweltauswirkungen** : Der Wolframabbau konzentriert sich hauptsächlich auf wenige Länder (wie China und Russland) und erfolgt meist im Tagebau oder Untertagebau. Der Abbau zerstört die Oberflächenvegetation, was zu Bodenerosion und Bodendegradation führt und das lokale Ökosystem beeinträchtigen kann. Die Wolframaufbereitung erfordert den Einsatz großer Mengen Wasser und chemischer Reagenzien (wie Flotationsmittel, einschließlich Sulfide oder organische Verbindungen). Unsachgemäß behandeltes Abwasser kann Oberflächen- oder Grundwasser verschmutzen. Der Nickelabbau (z. B. von Nickelsulfid oder Laterit-Nickelerz) ist ebenfalls mit Bodenaushub und Vegetationszerstörung verbunden. Der Nickelschmelzprozess erfordert Hochtemperaturschmelzen, einen hohen Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen. Der Eisenerzabbau erfolgt im großen Maßstab und geht mit der Ansammlung von Rückständen und dem Verbrauch von Wasserressourcen einher, was zu Eutrophierung oder Schwermetallbelastung von Gewässern führen kann. Die Herstellung der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung erfolgt mittels Pulvermetallurgie. Flüssigphasensintern (1450–1550 °C) und Heißisostatisches Pressen (HIP, 1200–1400 °C, 100–200 MPa) erfordern Hochtemperatur- und Hochdruckanlagen, verbrauchen viel Strom oder Erdgas und erhöhen den CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Zudem erfordert die Legierungspulveraufbereitung (z. B. die Zerstäubung) energieintensive Anlagen, was den Energieverbrauch weiter erhöht. Der Energiebedarf dieser Prozesse basiert größtenteils auf fossilen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Brennstoffen, was zu einem hohen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck führt.

**Folgenabschätzung** : Bergbauaktivitäten können zu Landbesetzungen und Umweltschäden führen, insbesondere in ökologisch sensiblen Gebieten, was strenge Maßnahmen zur Wiederherstellung der Umwelt erfordert. Unbehandelte Abwässer aus der Erzaufbereitung können Schwermetalle (wie Wolfram und Nickel) oder chemische Reagenzien in Gewässer einleiten und so das aquatische Ökosystem beeinträchtigen. Was den Energieverbrauch betrifft, so kann der Strombedarf für Sintern und heißisostatisches Pressen mehr als 50 % des gesamten Energieverbrauchs der Produktion ausmachen und die Treibhausgasemissionen erhöhen, insbesondere in Gebieten, die auf Kohlekraftwerke angewiesen sind. Die globalen Wolframvorkommen sind begrenzt, und eine Übernutzung kann zu deren Erschöpfung führen und die langfristige Nachhaltigkeit beeinträchtigen.

**Verbesserungsrichtung** : Der Einsatz umweltfreundlicher Mineralaufbereitungstechnologien (wie ungiftige Flotationsmittel oder Trockenaufbereitung) kann die Abwasserverschmutzung und den Chemikalieneinsatz reduzieren. Die Optimierung von Bergbauprozessen (wie Präzisionsstrahlen) kann die Bodenschädigung verringern. Die Energieeffizienz kann durch die Nutzung erneuerbarer Energien (wie Wind- oder Solarenergie) oder verbesserte Sinterprozesse (wie Niedertemperatursintern) verbessert werden. Das Recycling von Schrottlegerungen (wie Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt oder medizinischen Abschirmteilen) kann den Bedarf an Primärwolfram und -nickel senken und den Ressourcendruck verringern. Ein gestärktes Lieferkettenmanagement und die Diversifizierung der Wolframierzquellen können die durch Ressourcenknappheit verursachten ökologischen und wirtschaftlichen Risiken verringern.

### 7.1.2 Abfall und Emissionen

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen erzeugen eine Vielzahl von Abfällen und Emissionen, darunter Feststoffe, Abwasser, Abgase und Verarbeitungsnebenprodukte. Werden diese Abfälle nicht ordnungsgemäß entsorgt, können sie Boden, Wasser und Luft verschmutzen und so die Umwelt und die menschliche Gesundheit beeinträchtigen. Obwohl die Legierung selbst ungiftig ist, muss ihr Herstellungsprozess streng kontrolliert werden, um den Umweltschutzbestimmungen zu entsprechen.

**Umweltauswirkungen** : Während der Aufbereitungsphase enthalten die Rückstände von Wolfram- und Nickelerzen Schwermetalle (wie Wolfram, Nickel, Eisen) und andere Verunreinigungen, die bei unsachgemäßer Lagerung in Böden oder Gewässer gelangen und dort langfristige Umweltverschmutzung verursachen können. Beim Pulvermetallurgieprozess können beim Sintern und Heißisostatischen Pressen Abgase wie Kohlendioxid, Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und flüchtige organische Verbindungen (VOCs) entstehen, die ohne Filtration oder Adsorption Luftverschmutzung verursachen können. Bei Verarbeitungsschritten (wie Drehen, Fräsen oder Schleifen) entstehen Metallspäne, Kühlschmierstoffabfälle und Polierabfälle. Die im Kühlschmierstoff enthaltenen Öle oder chemischen Zusätze können Gewässer oder Böden verschmutzen. Bei der Oberflächenbehandlung (wie Galvanisieren oder chemische Reinigung) entstehen nickel- oder säurehaltige Abwässer, die bei unsachgemäßer Behandlung Gewässer verschmutzen oder giftige Gase freisetzen können. Aufgrund der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

potenziellen Allergenität von Nickel sind bei der Produktion und Verarbeitung Schutzmaßnahmen erforderlich, um Gesundheitsrisiken durch Kontakt mit Staub oder Abwässern zu vermeiden. Darüber hinaus kann das Recycling von Schrottlegerungsteilen (wie etwa medizinischen Kollimatoren oder militärischen Geschosskernen) zu Ressourcenverschwendung oder Schwermetallverschmutzung führen, wenn es nicht standardisiert ist.

**Folgenabschätzung** : Werden Rückstände und Abwässer nicht behandelt, können sie zu übermäßigen Schwermetallbelastungen im Boden oder zur Wasserverschmutzung führen und so Landwirtschaft und Ökosysteme beeinträchtigen. Abgasemissionen erhöhen die Luftverschmutzung, insbesondere in Produktionsgebieten, was zu regionalem Smog und Treibhauseffekt führen kann. Werden Prozessabfälle und Abwasser willkürlich entsorgt, können sie das Grundwasser verschmutzen oder Schadstoffe freisetzen, die die Gesundheit der Anwohner gefährden. Unsachgemäße Behandlung von Nickelstaub oder Abwasser kann berufsbedingte Gesundheitsrisiken wie Hautallergien oder Atemwegsreizungen verursachen. Die geringe Recyclingquote von Altlegierungen kann die Ressourcenverschwendung verschärfen und die Umweltbelastung erhöhen.

**Verbesserungsrichtung** : Der Einsatz geschlossener Wasseraufbereitungssysteme (wie Neutralisationsfällung oder Membranfiltration) kann Abwässer aus der Mineralverarbeitung und Galvanikabwässer effektiv behandeln und Schwermetallemissionen reduzieren. Rückstände können durch Verfestigung oder Verfüllung behandelt werden, um Verschmutzungen durch Leckagen zu vermeiden. Abgase können mit Hochleistungsfiltern oder Katalysatoren behandelt werden, um NO<sub>x</sub>- und VOC-Emissionen zu reduzieren. Verarbeitungsabfälle können durch Klassifizierung recycelt und wiederverwendet werden (z. B. Metallspäne zurück in den Ofen), um Abfall zu reduzieren. Das Recycling von Altlegierungen muss gestärkt und effiziente Trenntechnologien (wie chemische Auflösung oder Elektrolyse) entwickelt werden, um die Rückgewinnungsrate von Wolfram und Nickel zu erhöhen. Umweltfreundliche Kühlschmierstoffe oder Trockenaufbereitung können im Produktionsprozess eingesetzt werden, um die Abfallproduktion zu reduzieren. Angesichts der Gesundheitsrisiken von Nickel müssen Schutzmaßnahmen (wie geschlossene Betriebe und Schutzausrüstung) verstärkt werden, um das Expositionsrisiko der Arbeitnehmer zu verringern. Die Einhaltung internationaler Umweltstandards (wie ISO 14001) kann die Produktion weiter standardisieren und die Umweltbelastung reduzieren.

## 7.2 Grüne Fertigungstechnologie

Die nachhaltige Entwicklung der Wolfram-Nickel-Eisen-Produktion erfolgt durch optimierte Produktionsprozesse, reduzierten Ressourcenverbrauch und geringere Umweltbelastung. Wolfram-Nickel-Eisen wird aufgrund seiner hohen Dichte, seiner hervorragenden mechanischen Eigenschaften und seiner Korrosionsbeständigkeit häufig in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin und in der Präzisionsinstrumententechnik eingesetzt. Der Produktionsprozess ist jedoch mit hohem Energieverbrauch und potenzieller Umweltbelastung verbunden. Grüne Fertigungstechnologie reduziert Energieverbrauch, Abfallemissionen und Umweltbelastung durch umweltfreundliche Herstellungsverfahren und energiesparende Technologien und verbessert gleichzeitig die

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Produktionseffizienz und den wirtschaftlichen Nutzen. Im Folgenden wird die Anwendung umweltfreundlicher Herstellungsverfahren und energiesparender Technologien bei der Herstellung von Wolfram-Nickel-Eisen detailliert erläutert.

### 7.2.1 Umweltfreundliche Aufbereitungsmethode

Umweltfreundliche Aufbereitungsmethoden reduzieren negative Auswirkungen auf die Umwelt durch die Optimierung der Rohstoffverarbeitung, der Legierungsproduktion und der Nachbearbeitungsprozesse. In der Rohstoffverarbeitungsphase werden effiziente Sieb- und Reinigungstechnologien eingesetzt, um auf die in herkömmlichen Verfahren in großen Mengen verwendeten starken Säuren und Laugen zu verzichten. Stattdessen wird physikalische Sortierung in Kombination mit biologischer Laugung eingesetzt, um Wolfram, Nickel, Eisen und andere Rohstoffe zu extrahieren. Dies reduziert nicht nur die chemische Verschmutzung, sondern verbessert auch die Rohstoffnutzung und verringert die Ressourcenverschwendung .

Bei der Legierungsherstellung kommt die Technologie des grünen Schmelzens zum Einsatz. Durch die präzise Steuerung von Temperatur, Atmosphäre und Materialverhältnis im Ofen wird eine effiziente Energienutzung erreicht und der durch Brennstoffverbrauch verursachte Kohlenstoffausstoß reduziert. Gleichzeitig wird ein geschlossenes Kreislaufsystem eingesetzt, um die im Produktionsprozess entstehenden Abgase zu reinigen und wiederzuverwenden. Die Abfallschlacke wird zerkleinert und gemahlen und anschließend als Hilfsstoff in der Produktion wiederverwendet, was die Abfallmenge deutlich reduziert .

Im Nachbehandlungsprozess werden umweltfreundliche Reinigungsmittel anstelle herkömmlicher phosphor- und schwermetallhaltiger Reinigungsmittel eingesetzt. Gleichzeitig wird die Sauberkeit der Legierungsoberfläche gewährleistet und die Verschmutzung von Boden und Gewässern durch Abwasser vermieden. Mit diesen Methoden kann die hohe Leistungsfähigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen erhalten und gleichzeitig der Einsatz von Chemikalien, die Abfallerzeugung und die Schadstoffemissionen reduziert werden .

Dieses Herstellungsverfahren, das sowohl Umweltschutz als auch Leistung berücksichtigt, ermöglicht es, die Bedürfnisse von Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt und der medizinischen Versorgung zu erfüllen, in denen extrem hohe Anforderungen an Materialeistung und Umweltschutz gestellt werden, und legt damit eine solide Grundlage für die nachhaltige Anwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen.

### Umweltfreundliche Aufbereitungstechnik :

- **Grüne Aufbereitungstechnologie** : Bei der traditionellen Wolfram- und Nickelerzaufbereitung werden schwefelhaltige oder organische Flotationsmittel verwendet, die anfällig für die Entstehung schädlicher Abwässer sind. Bei der grünen Aufbereitung werden ungiftige oder wenig giftige Flotationsmittel (wie Fettsäuren oder biobasierte Reagenzien) eingesetzt, um

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schwermetalle und chemische Schadstoffe im Abwasser zu reduzieren. Trockenaufbereitung (z. B. durch Luftstromtrennung) kann den Wasserverbrauch senken und die Abwasserbehandlung entlasten. Das geschlossene Wasseraufbereitungssystem gewinnt Metallionen im Aufbereitungsabwasser durch Neutralisation, Fällung oder Membranfiltration zurück und beugt so Wasserverschmutzung vor.

- **Effiziente Pulveraufbereitung** : Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden pulvermetallurgisch hergestellt. Die Pulveraufbereitung erfolgt durch Zerstäubung oder mechanisches Legieren. Die umweltfreundliche Zerstäubungstechnologie verwendet Inertgas (z. B. Argon) anstelle von Luft, um Oxideinschlüsse zu reduzieren und den Energieverbrauch für die anschließende Reinigung zu senken. Mechanisches Legieren bereitet das Legierungspulver durch Hochenergie-Kugelmahlen auf, wodurch der Einsatz chemischer Reagenzien reduziert und die Rohstoffausnutzung verbessert werden kann. Das Altpulverrückgewinnungssystem sammelt und recycelt den Staub in der Produktion, um Ressourcenverschwendung zu reduzieren.
- **Grünsinterprozess** : Das Flüssigphasensintern (1450–1550 °C) ist der zentrale Schritt der Legierungsherstellung. Das traditionelle Verfahren nutzt fossile Brennstoffe zum Erhitzen, was hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht. Beim Grünsintern kommt Plasmasintern (SPS) oder Mikrowellensintern zum Einsatz, das schnell und lokal erhitzt und so Wärmeverluste und Abgasemissionen reduziert. Die Nutzung sauberer Energie (wie Solar- oder Windenergie) zur Stromversorgung des Systems kann den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck weiter reduzieren. Die Optimierung der Sinteratmosphäre (z. B. hochreines Argon) reduziert die Oxidbildung und verringert den Bedarf an Abgasnachbehandlung.
- **Umweltfreundliche Nachbearbeitung** : Mechanische Bearbeitung und Oberflächenbehandlung (wie Galvanisieren oder chemische Reinigung) erzeugen häufig Abfallflüssigkeiten und -materialien. Bei der umweltfreundlichen Nachbearbeitung werden Trockenschneiden oder umweltfreundliche Schneidflüssigkeiten (wie wasserbasierte oder biobasierte Schneidflüssigkeiten) eingesetzt, um den Ausstoß schädlicher Abfallflüssigkeiten zu reduzieren. Galvanik-Abfallflüssigkeiten werden mittels Ionenaustausch oder elektrochemischer Rückgewinnung behandelt, um Nickel oder andere Metalle zurückzugewinnen und die Umweltverschmutzung zu reduzieren. Beim Oberflächenpolieren kann Laser- oder Ultraschallpolieren das herkömmliche chemische Polieren ersetzen und den Einsatz chemischer Reagenzien reduzieren.

**Umweltvorteile** : Die umweltfreundliche Mineralaufbereitung reduziert Schwermetall- und chemische Schadstoffe im Abwasser und schützt so Gewässer und Böden. Effiziente Pulveraufbereitung und Altpulverrecycling verbessern die Ressourcennutzung und reduzieren den Bedarf an primären Wolfram- und Nickelerzen. Der umweltfreundliche Sinterprozess reduziert Kohlenstoffemissionen und Abgase und verbessert so die Luftqualität. Die umweltfreundliche Nachbearbeitung reduziert Abfallflüssigkeiten und Abfallverschmutzung und verbessert die Nachhaltigkeit des Produktionsprozesses.

**Technische Herausforderungen und Optimierung** : Die Technologie der grünen Aufbereitung muss Leistung und Kosten in Einklang bringen. Die Anfangsinvestitionen in umweltfreundliche

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Flotationsmittel und Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien sind hoch. Die Kosten müssen durch eine Massenproduktion gesenkt werden, beispielsweise durch den Aufbau großer gemeinsamer Produktionslinien, um Ressourcen und Kosten zu teilen. Grünes Sintern (z. B. SPS) erfordert hohe Präzision der Anlagen, und die Prozessparameter müssen optimiert werden, um die Legierungsdichte und die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur zu gewährleisten. Parameteroptimierungsmodelle können mithilfe mehrerer experimenteller Datensätze erstellt werden. Das Rückgewinnungssystem für Abfallflüssigkeiten muss effizient arbeiten und mit Echtzeit-Überwachungsgeräten ausgestattet sein, um Sekundärverschmutzung zu vermeiden und das Ressourcenrecycling zu verbessern. Die Entwicklung kostengünstiger, umweltfreundlicher Reagenzien und intelligenter Produktionssteuerungssysteme kann die Effizienz und Durchführbarkeit der grünen Aufbereitung zukünftig weiter verbessern und die nachhaltige Entwicklung der Branche fördern.

### 7.2.2 Energiespartechnologien

Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden durch Optimierung des Energieverbrauchs im Produktionsprozess reduziert. Die Legierungsherstellung ist mit hohem Energieverbrauch verbunden (z. B. Sintern, heißisostatisches Pressen und mechanische Bearbeitung). Der Einsatz energiesparender Technologien reduziert nicht nur die Umweltbelastung, sondern senkt auch die Produktionskosten und verbessert die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit.

#### Energiespartechnologie :

- **Hocheffiziente Sintertechnologie** : Beim traditionellen Flüssigphasensintern werden Widerstands- oder Gasöfen verwendet, die einen hohen Energieverbrauch und einen geringen thermischen Wirkungsgrad aufweisen. Schnellsintertechnologien wie Spark-Plasma-Sintern (SPS) oder Mikrowellensintern erhitzen das Pulver direkt durch hochfrequente elektrische Felder oder Mikrowellen. Dadurch verkürzt sich die Heizzeit auf wenige Minuten und der Energieverbrauch sinkt um 30–50 % im Vergleich zum herkömmlichen Sintern (mehrere Stunden). Die Niedertemperatur-Sintertechnologie senkt die Sintertemperatur durch Optimierung der Pulverpartikelgröße und der Additive (wie Nano-Nickelpulver) auf 1300–1400 °C und reduziert so den Energieverbrauch.
- **Optimierung des Heißisostatischen Pressens** : Heißisostatisches Pressen (HIP) dient der Erhöhung der Legierungsdichte. Herkömmliche Verfahren erfordern hohe Temperaturen und Drücke (1200–1400 °C, 100–200 MPa), was einen hohen Energieverbrauch verursacht. Energiesparendes HIP nutzt effiziente Dämmstoffe und präzise Druckregelung, um Wärmeverlust und Stromverbrauch zu reduzieren. Intermittierende HIP-Prozesse können den Energieverbrauch durch Optimierung des Druckzyklus und damit Verkürzung der Betriebszeit senken. Die Nutzung erneuerbarer Energien (wie Wind- oder Solarenergie) zur Stromversorgung von HIP-Anlagen kann den CO<sub>2</sub>-Ausstoß weiter reduzieren.
- **Intelligente Bearbeitungstechnologie** : Mechanische Bearbeitungen (wie Drehen und Fräsen) verbrauchen aufgrund der hohen Härte der Legierung (Vickershärte 350–400 HV) viel Energie. Das intelligente Bearbeitungssystem überwacht Schnittkraft und -temperatur in Echtzeit und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

passt die Schnittparameter (wie Drehzahl und Vorschub) dynamisch an, um die Bearbeitungseffizienz zu verbessern und den Energieverbrauch zu senken. Trockenbearbeitung oder Minimalmengenschmierung (MMS) reduziert den Kühlschmierstoffverbrauch und den Energieverbrauch für Kühlung und Abfallbehandlung. Laser- oder Funkenerosion ermöglichen hochpräzise Mikrobearbeitung, reduzieren Materialabfall und den Energieverbrauch der Sekundärbearbeitung.

- **Energierückgewinnung und -management** : Ein Abwärmerückgewinnungssystem kann im Produktionsprozess eingesetzt werden, um die Abwärme des Sinterofens oder der HIP-Anlage zum Vorwärmen von Rohstoffen oder zum Heizen der Fabrik zu nutzen und so Energieverschwendung zu reduzieren. Das intelligente Energiemanagementsystem optimiert die Betriebszeit der Anlagen durch Sensoren und Datenanalyse, um Leerlauf zu vermeiden. Energieaudits auf Fabrikebene können energieintensive Anlagen identifizieren und gezielte Energiesparmaßnahmen entwickeln.

**Umweltvorteile** : Hocheffiziente Sinter- und heißisostatische Presstechnologien reduzieren den Strom- und Gasverbrauch sowie die Treibhausgasemissionen deutlich. Intelligente Verarbeitungstechnologien verbessern die Materialausnutzung, reduzieren das Abfallaufkommen und senken den Energieverbrauch der Abfallbehandlung. Energierückgewinnungssysteme verbessern die Gesamtenergieeffizienz und reduzieren den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Produktionsprozesses. Diese Technologien tragen dazu bei, dass die Produktion von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen besser mit Umweltvorschriften (wie ISO 14001) und den Zielen der nachhaltigen Entwicklung im Einklang steht .

**Technische Herausforderungen und Optimierung** : Die Investitionskosten für energiesparende Technologien sind hoch. Beispielsweise erfordern SPS und intelligente Verarbeitungssysteme hochpräzise Geräte, deren Kosten durch Massenproduktion gesenkt werden müssen. Niedertemperatursintern kann die Eigenschaften der Legierung beeinträchtigen, daher müssen Formel und Prozessparameter optimiert werden, um Festigkeit und Dichte zu gewährleisten. Die Effizienz des Energierückgewinnungssystems wird durch das Anlagendesign begrenzt, daher muss eine effizientere Wärmeaustauschtechnologie entwickelt werden. Zukünftig kann die Kombination von künstlicher Intelligenz und IoT-Technologien eine Echtzeitoptimierung des Produktionsprozesses ermöglichen und so den Energieverbrauch und die Umweltbelastung weiter reduzieren.

### 7.3 Recycling und Wiederverwendung

Recycling und Wiederverwendung sind wichtige Bestandteile der umweltfreundlichen Herstellung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen. Sie können die Abhängigkeit von knappen Ressourcen deutlich reduzieren, die Umweltbelastung senken und die Produktionskosten senken. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen finden aufgrund ihrer hohen Dichte (16,5–18,75 g/cm<sup>3</sup>), ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit 800–1000 MPa) und ihrer Korrosionsbeständigkeit breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin und in der Präzisionsinstrumententechnik. Die Knappheit der Wolframressourcen und der hohe Energieverbrauch des Produktionsprozesses machen Recycling und Wiederverwendung jedoch zum Schlüssel für eine

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nachhaltige Entwicklung. Durch fortschrittliche Legierungsrecyclingtechnologie und ihre Rolle in der Kreislaufwirtschaft können Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen Ressourcenverschwendung und Umweltbelastung effektiv reduzieren und gleichzeitig den wirtschaftlichen Nutzen steigern. Im Folgenden werden die Legierungsrecyclingtechnologie und ihre Rolle in der Kreislaufwirtschaft im Detail erläutert.

### 7.3.1 Technologie zur Legierungsrückgewinnung

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen zielen darauf ab, Metalle wie Wolfram, Nickel und Eisen aus Schrottteilen, Verarbeitungsabfällen oder Produktionsnebenprodukten zu trennen und wiederzuverwenden, um den Bedarf an Primärressourcen zu senken und die Umweltbelastung zu verringern. Der Recyclingprozess umfasst eine Kombination aus physikalischen, chemischen und metallurgischen Technologien, um sicherzustellen, dass die Reinheit und die Eigenschaften der recycelten Materialien den Anforderungen von Hochleistungsanwendungen (wie Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt oder medizinischen Abschirmteilen) entsprechen.

#### Recyclingtechnologie :

- **Physikalisches Recycling und Sortierung** : Abfallteile aus Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen (wie Gegengewichte für die Luft- und Raumfahrt, medizinische Kollimatoren oder Kerne für militärische Geschosse) werden zunächst durch mechanisches Zerkleinern und Mahlen zu kleinen Partikeln oder Pulver verarbeitet. Sortiertechniken (wie Magnet- oder Schwerkrafttrennung) werden eingesetzt, um Metall von nichtmetallischen Verunreinigungen in der Legierung zu trennen. Durch Magnettrennung lassen sich Eisen und Nickel aufgrund der schwachen ferromagnetischen Eigenschaften der Legierung trennen, während hochverdichtete Wolframpartikel durch Schwerkrafttrennung extrahiert werden können. Verarbeitungsabfälle (wie Bohrspäne oder Schleifpulver) werden gesiebt und gewaschen, um Schneidflüssigkeiten und Öle zu entfernen und so saubere Rohstoffe für die nachfolgende Verarbeitung bereitzustellen.
- **Chemische Rückgewinnung** : Bei der chemischen Rückgewinnung werden Wolfram, Nickel und Eisen durch saure oder alkalische Lösungsprozesse aus Legierungen getrennt . Beispielsweise können Salpetersäure- oder Salzsäurelösungen Nickel und Eisen lösen, wobei Wolframoxid ( $WO_3$ ) oder Wolframat zurückbleibt, das dann durch einen Reduktionsprozess (z. B. Wasserstoffreduktion) in hochreines Wolframpulver umgewandelt werden kann. Nickel und Eisen können durch elektrochemische Abscheidung oder chemische Fällung aus der Lösung zurückgewonnen werden, um hochreine Metallsalze oder Metallpulver herzustellen. Die chemische Rückgewinnung erfordert eine strenge Kontrolle des pH-Werts der Lösung und der Reaktionsbedingungen, um Sekundärkontaminationen zu vermeiden.
- **Metallurgische Rückgewinnung** : Hochtemperaturmetallurgische Verfahren (wie Lichtbogenofenschmelzen oder Vakuumschmelzen) können die Altlegierung direkt schmelzen und Wolfram, Nickel und Eisen trennen. Das Vakuumschmelzen erfolgt in einer inerten Atmosphäre (z. B. Argon), um die Oxidbildung zu reduzieren und die Reinheit des zurückgewonnenen Metalls zu verbessern. Das zurückgewonnene Metallpulver kann

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pulvermetallurgisch (Flüssigphasensintern, 1450–1550 °C) neu legiert werden, um sicherzustellen, dass die Eigenschaften (z. B. Dichte > 99,5 %) den Standards entsprechen. Heißisostatisches Pressen (HIP, 1200–1400 °C, 100–200 MPa) kann die mikrostrukturelle Homogenität der zurückgewonnenen Legierung weiter verbessern.

- **Fortschrittliche Recyclingtechnologien** : Neue Technologien wie Plasmabehandlung und elektrochemisches Recycling können die Recyclingeffizienz verbessern. Bei der Plasmabehandlung wird ein Hochtemperatur-Plasmalichtbogen eingesetzt, um Legierungen zu zersetzen, Metallkomponenten schnell zu trennen und den Einsatz chemischer Reagenzien zu reduzieren. Beim elektrochemischen Recycling werden Wolfram, Nickel und Eisen durch Elektrolyse getrennt, wodurch Energieverbrauch und Abfallaufkommen reduziert werden. Diese Technologien eignen sich für die Verarbeitung komplex geformter Schrottteile oder Anwendungen mit hohen Reinheitsanforderungen.

**Ökologische und wirtschaftliche Vorteile** : Physikalisches Recycling reduziert die Abfallmenge und verringert das Risiko von Boden- und Wasserverschmutzung. Chemisches und metallurgisches Recycling erhöht die Rückgewinnungsrate von Wolfram und Nickel (bis über 90 %), reduziert den Abbau von Primärmineralien und schont natürliche Ressourcen. Fortschrittliche Recyclingtechnologie reduziert Energieverbrauch und Abfallemissionen und erfüllt Umweltvorschriften (wie ISO 14001). Wirtschaftlich gesehen senkt Recycling die Rohstoffkosten (Wolfram macht 60–70 % der Legierungskosten aus) und verbessert die Produktionseffizienz.

**Technische Herausforderungen und Optimierung** : Der Recyclingprozess muss die Reinheit des Metalls gewährleisten. Verunreinigungen wie Sauerstoff und Kohlenstoff müssen durch mehrstufige Filtrations- und Raffinationsprozesse entfernt werden, um eine Beeinträchtigung der Legierungseigenschaften zu verhindern. Chemisches Recycling kann säurehaltige Abwässer erzeugen, die ein effizientes Abwasseraufbereitungssystem (z. B. Ionenaustausch oder Neutralisation) erfordern, kombiniert mit Online-pH-Überwachung und präziser Kontrolle zur Vermeidung von Verunreinigungen. Das Recycling komplexer Komponenten (z. B. medizinischer Abschirmteile) erfordert eine effiziente Sortiertechnologie, die mittels Spektralerkennung Legierungen schnell von anderen Materialien trennt. Zukünftig kann die Entwicklung automatisierter Recyclinganlagen und intelligenter Sortiersysteme die Effizienz steigern und die Arbeitskosten senken. Die Optimierung chemischer Recyclingprozesse (z. B. durch den Einsatz umweltfreundlicher Lösungsmittel) und deren Kombination mit Recyclinggeräten kann die Umweltbelastung weiter reduzieren und die Wirtschaftlichkeit des Recyclings verbessern.

### 7.3.2 Rollen in der Kreislaufwirtschaft

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen spielen eine wichtige Rolle in der Kreislaufwirtschaft. Durch Recycling, Wiederverwendung und Ressourcenzirkulation werden Ressourcenverschwendung, Umweltverschmutzung und Produktionskosten reduziert und eine nachhaltige Entwicklung gefördert. Die Kreislaufwirtschaft legt Wert auf effiziente Ressourcennutzung und Kreislaufwirtschaft. Durch Recycling und Wiederverwendung können Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen von einer Einweg- zu einer nachhaltigen und zyklischen Ressource werden und so die nachhaltige Entwicklung in der Luft-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Raumfahrt, der Medizin und anderen Bereichen unterstützen.

#### **Rolle der Kreislaufwirtschaft :**

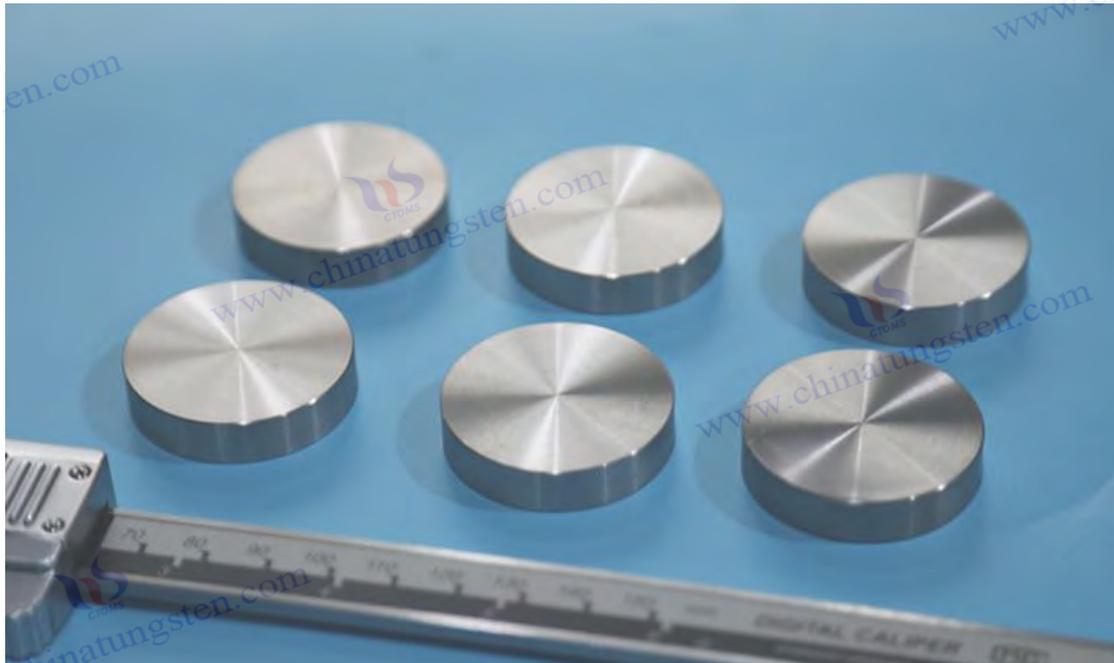
- **Ressourcenrecycling** : Der hohe Wert der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung (aufgrund der Seltenheit und der hohen Kosten von Wolfram) macht sie zu einem idealen Kandidaten für die Kreislaufwirtschaft. Abfalllegierungsteile (wie z. B. Gegengewichte aus der Luftfahrt, Kerne militärischer Geschosse oder medizinische Kollimatoren) werden durch Recyclingtechnologie in hochreines Wolfram, Nickel und Eisen umgewandelt und anschließend zur Herstellung neuer Legierungen verwendet. Dadurch verringert sich die Abhängigkeit von primärem Wolfram- und Nickelerz. Verbesserte Recyclingraten können die durch den Rohstoffabbau verursachten Landschaften und die Wasserverschmutzung deutlich reduzieren.
- **Abfallminimierung** : Recyclingtechnologien wie physikalische Sortierung und chemisches Recycling wandeln Verarbeitungsabfälle (wie Schnittgut) und Schrottteile in wiederverwendbare Rohstoffe um und reduzieren so die Abfallmenge und die Umweltbelastung. Geschlossene Recyclingkreisläufe maximieren die Ressourcennutzung, indem sie Abfälle direkt in die Produktion zurückführen. Beispielsweise können Gegengewichte aus der Luft- und Raumfahrt zu ähnlichen Teilen weiterverarbeitet werden, was die Entsorgungskosten senkt.
- **Verbesserte Energieeffizienz** : Der Recyclingprozess verbraucht weniger Energie als die Primärmetallraffination. Beispielsweise ist der Energieverbrauch beim Recycling von Wolframpulver etwa 30–50 % niedriger als bei der Raffination von Wolframerz. Durch die Kombination energiesparender Technologien (wie Plasmarecycling oder Niedertemperatursintern) reduziert die Legierungsproduktion in der Kreislaufwirtschaft die CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter und erfüllt die Ziele einer umweltfreundlichen Produktion.
- **Nachhaltigkeit in der Lieferkette** : Das Recycling von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen unterstützt ein geschlossenes Lieferkettenmanagement in der Kreislaufwirtschaft. Durch den Aufbau eines globalen Recyclingnetzwerks und die Standardisierung von Recyclingprozessen können Hersteller eine stabile Versorgung mit Ressourcen wie Wolfram und Nickel sicherstellen und die durch geopolitische oder Marktschwankungen bedingten Risiken reduzieren. Dies ist besonders wichtig für Wolfram, eine knappe Ressource, da es den Druck auf die Lieferkette verringern kann.

**Anwendung und Auswirkungen** : In der Luft- und Raumfahrt können recycelte Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen zur Herstellung von Gegengewichten oder hochtemperaturbeständigen Teilen verwendet werden, was die Produktionskosten senkt und die Umweltbelastung verringert. Im medizinischen Bereich können durch das Recycling von Abschirmungs- und Kollimatorabfällen neue Teile kreislaufwirtschaftlich hergestellt werden, wobei strenge Umwelt- und Sicherheitsstandards eingehalten werden. In der Rüstungsindustrie kann das Recycling von Kernmaterialien die Ressourcenverschwendung reduzieren und gleichzeitig das Risiko im Umgang mit empfindlichen Materialien verringern. Die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft verbessert die Nachhaltigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen und macht sie für Hochleistungsanwendungen wettbewerbsfähiger.

**Technische Herausforderungen und Optimierung** : Die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft erfordert

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Überwindung der Kosten- und Effizienzengpässe der Recyclingtechnologie. Die anfänglichen Investitionen in Recyclinganlagen sind hoch, und die Kosten müssen durch Massenproduktion und politische Unterstützung gesenkt werden. Die Zusammensetzung von Schrottlegerungen aus verschiedenen Quellen ist komplex, und es müssen effiziente Sortier- und Reinigungstechnologien entwickelt werden, um die Qualität der recycelten Materialien zu gewährleisten. Die Integration der Lieferkette muss die branchenübergreifende Zusammenarbeit stärken und ein geschlossenes Kreislaufsystem von der Abfallsammlung bis zur Wiederverwendung etablieren. Künstliche Intelligenz und Big Data können künftig den Recyclingprozess optimieren, die Abfallzusammensetzung vorhersagen und Recyclingparameter anpassen, um Effizienz und Materialreinheit zu verbessern.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

CTIA GROUP LTD  
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

**High Density:** Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm<sup>3</sup>.

**High Strength:** Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

**Other Characteristics:** Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
<b>Composition (%)</b>	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
<b>Density (g/cm<sup>3</sup>)</b>	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
<b>Heat Treatment</b>	Sintering						
<b>Tensile Strength (PSI)</b>	900~1000		900~1100		920~1100		
<b>Elongation (%)</b>	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
<b>Hardness (HRC)</b>	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

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)

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Kapitel 8 Häufig gestellte Fragen und Antworten

Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen werden aufgrund ihrer hohen Dichte (16,5–18,75 g/cm<sup>3</sup>), ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit 800–1000 MPa, Dehnung 10–20 %) und ihrer Korrosionsbeständigkeit häufig in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin und in Präzisionsinstrumenten eingesetzt.

Missverständnisse hinsichtlich ihrer Leistung, Herstellung und Anwendung sowie praktische Probleme in Technologie und Anwendung bereiten Anwendern und Herstellern jedoch häufig Kopfzerbrechen. Dieses Kapitel soll häufige Missverständnisse klären, Fragen zu Technologie und Anwendung beantworten und Expertenratschläge und Lösungen bieten, um Anwendern das Verständnis und die Verwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen zu erleichtern.

### 8.1 Häufige Missverständnisse über Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen

Die meisten Missverständnisse über Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen beruhen auf falschen Vorstellungen über ihre Eigenschaften, Zusammensetzung oder Anwendungsszenarien. Diese Missverständnisse können dazu führen, dass Anwender bei der Materialauswahl oder der Anwendungsentwicklung falsche Entscheidungen treffen. Im Folgenden sind einige häufige Missverständnisse und ihre Erklärungen aufgeführt:

#### **Irrtum 1: Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist völlig unmagnetisch**

Erläuterung: Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen weisen aufgrund ihres Eisengehalts (1–5 %) einen schwachen Ferromagnetismus (Sättigungsmagnetisierung 0,1–0,3 T) auf und sind daher nicht vollständig unmagnetisch. Dies unterscheidet sie von Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen (völlig unmagnetisch). Schwacher Ferromagnetismus hat in den meisten Anwendungen (z. B. Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt oder medizinischen Abschirmteilen) kaum Auswirkungen. In hochsensiblen elektromagnetischen Umgebungen (z. B. MRT-Geräten) ist jedoch besondere Vorsicht geboten. Anwender können magnetische Störungen durch Reduzierung des Eisengehalts oder den Einsatz nichtmagnetischer Beschichtungen (z. B. DLC) reduzieren.

#### **Missverständnis 2: Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung hat die gleichen Eigenschaften wie reines Wolfram**

Erläuterung: Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen verbessern die Sprödigkeit und Verarbeitungsschwierigkeiten von reinem Wolfram durch die Zugabe von Nickel und Eisen. Reines Wolfram (Dichte 19,25 g/cm<sup>3</sup>, hohe Härte) ist schwer zu bearbeiten und neigt zu Sprödbruch. Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen (Dichte 16,5–18,75 g/cm<sup>3</sup>) weisen hingegen eine bessere Zähigkeit (Dehnung 10–20 %) und Verarbeitungsleistung auf und eignen sich für die Herstellung komplex geformter Teile (z. B. medizinischer Kollimatoren). Ihre Dichte und Festigkeit sind jedoch etwas geringer als bei reinem Wolfram und müssen je nach Anwendungsanforderungen abgewogen werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Mythos 3: Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung ist völlig ungiftig und hat keine Auswirkungen auf die Umwelt**

Klarstellung: Obwohl Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen umweltfreundlicher (ungiftiger) sind als bleibasierte Legierungen, ist Nickel potenziell allergen und kann bei längerem Kontakt Haut- oder Gewebereaktionen hervorrufen. Daher sind Biokompatibilitätstests bei medizinischen Implantatanwendungen erforderlich. Der Produktionsprozess (Bergbau, Sintern) ist mit Energieverbrauch und Abfallemissionen verbunden, die Auswirkungen auf die Umwelt haben können (z. B. durch Abfallverschmutzung). Umweltfreundliche Fertigungs- und Recyclingtechnologien können diese Auswirkungen reduzieren, sind aber nicht völlig frei von Umweltbelastungen.

### **Mythos 4: Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen sind kostengünstig und lassen sich leicht in Massenproduktion herstellen**

Wolfram -Nickel-Eisen-Legierungen sind relativ teuer, was hauptsächlich auf die Knappheit der Wolframressourcen und den komplexen Raffinationsprozess zurückzuführen ist. Wolfram ist schwer abzubauen, und die Auswahl und Reinigung erfordert mehrere komplexe Prozesse. Zudem werden während des Raffinationsprozesses große Mengen an Energie und Reagenzien verbraucht, was die Rohstoffkosten weiter in die Höhe treibt. In der Produktions- und Verarbeitungsphase erfordert die Pulvermetallurgie hochpräzise Geräte, um die gleichmäßige Mischung und die Formqualität des Pulvers zu gewährleisten. Die Präzisionsbearbeitung (wie CNC, EDM) erfordert nicht nur energieintensive Geräte, sondern auch den Einsatz spezieller, verschleißfester Werkzeuge. Der Verlust und Austausch dieser Werkzeuge erhöhen die Kosten zusätzlich. Im Gegensatz dazu sind Stahl- oder Bleiressourcen reichlich vorhanden, die Raffinations- und Verarbeitungstechnologie ist ausgereift und einfach, und die Produktionskosten sind deutlich niedriger als bei Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen, was die Anwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in einigen Low-Budget-Bereichen einschränkt. Obwohl durch optimierte Prozesse (wie etwa die additive Fertigung) Materialabfälle und Verarbeitungsschritte reduziert werden können und Recycling auch die Abhängigkeit von Primärressourcen verringern und dadurch die Kosten bis zu einem gewissen Grad senken kann, sind für eine Produktion im großen Maßstab und eine deutliche Kostensenkung noch immer Durchbrüche bei der Materialformulierung, den Produktionsanlagen und der Prozesstechnologie erforderlich.

## **8.2 Häufige Probleme in Technik und Anwendung**

Bei der Herstellung und Anwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen können verschiedene technische Probleme auftreten, die Materialeigenschaften, Verarbeitungsschwierigkeiten und die Anwendungsumgebung betreffen. Im Folgenden sind häufige Probleme und ihre Ursachen aufgeführt:

### **Problem 1: Risse oder Oberflächendefekte während der Bearbeitung.**

Ursache: Die hohe Härte (Vickershärte 350–400 HV) und die mäßige Zähigkeit von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen erschweren die Bearbeitung. Hochgeschwindigkeitsschneiden oder ungeeignete

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

Schneidparameter können zu Spannungskonzentrationen und Mikrorissen führen. Auch Inhomogenitäten in der Mikrostruktur (wie Poren oder Einschlüsse) können Oberflächendefekte verursachen. Auswirkungen: In Gegengewichten für die Luft- und Raumfahrt oder medizinischen Kollimatoren können Risse die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Komponenten beeinträchtigen.

#### **Problem 2: Die Legierungsleistung ist instabil oder entspricht nicht den Erwartungen.**

Ursache: Eine falsche Sintertemperatur (1450–1550 °C) oder eine falsche Atmosphärenkontrolle während der Produktion kann zu erhöhter Porosität (> 1 %) oder Komponentenseigerung (z. B. ungleichmäßige Verteilung von Nickel und Eisen) führen. Unzureichende Reinheit der Rohstoffe (Verunreinigungen wie Sauerstoff und Kohlenstoff) kann ebenfalls die Festigkeit oder Zähigkeit verringern. Auswirkungen: Bei militärischen panzerbrechenden Kernen oder Dämpfungsblöcken für Präzisionsinstrumente kann eine instabile Leistung zu Ausfällen oder verminderter Genauigkeit führen.

#### **Problem 3: Biokompatibilitätsprobleme bei medizinischen Anwendungen.**

Grund: Die potenzielle Allergenität von Nickel kann allergische Reaktionen bei Langzeitimplantaten (z. B. interventionellen Gewichten) oder bei Hautkontakt auslösen. Unsachgemäße Oberflächenbehandlung (z. B. Ablösen der galvanischen Schicht) kann Nickelionen freisetzen. Auswirkungen: Kann die Verwendung von Legierungen in medizinischen Implantaten oder Komponenten chirurgischer Roboter einschränken.

#### **Problem 4: Magnetische Interferenzen bei hochempfindlichen Anwendungen.**

Ursache: Der schwache Ferromagnetismus der Legierung (aufgrund des Eisengehalts von 1–5 %) kann in hochempfindlichen elektromagnetischen Umgebungen (wie MRT-Geräten oder Fotolithografie) leichte Interferenzen verursachen und so die Genauigkeit der Geräte beeinträchtigen. Auswirkungen: Bei Präzisionsinstrumenten oder medizinischen Geräten ist eine zusätzliche Verarbeitung erforderlich, um die Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit zu erfüllen.

#### **Problem 5: Überhöhte Produktionskosten.**

Gründe: Wolfram ist knapp und seine Raffination aufwendig. Pulvermetallurgie und heißisostatisches Pressen (HIP) erfordern energieintensive Anlagen. Präzisionsbearbeitung erfordert hochverschleißfeste Werkzeuge (wie CBN), was die Gesamtkosten in die Höhe treibt. Auswirkungen: Begrenzt die Förderung von Legierungen in kostensensiblen Bereichen, wie z. B. zivilen Konsumgütern.

### **8.3 Expertenrat und Lösungen**

Als Reaktion auf die oben genannten Missverständnisse und Probleme unterbreiten Experten die folgenden Vorschläge und Lösungen zur Optimierung der Produktion und Anwendung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen:

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

### Zur Bearbeitung von Rissen und Defekten

- Empfehlung: Optimieren Sie die Schnittparameter (z. B. niedrige Schnittgeschwindigkeit, entsprechender Vorschub) und verwenden Sie hochverschleißfeste Werkzeuge (z. B. CBN- oder Diamantwerkzeuge). Nutzen Sie Trockenbearbeitung oder Minimalmengenschmierung (MMS), um thermische Spannungen zu reduzieren.
- Lösung: Beseitigen Sie Porosität und stellen Sie eine homogene Mikrostruktur durch heißisostatisches Pressen (HIP, 1200–1400 °C, 100–200 MPa) vor der Produktion sicher. Führen Sie nach der Verarbeitung zerstörungsfreie Prüfungen (z. B. Ultraschall- oder Röntgenprüfung) durch, um mögliche Defekte zu identifizieren.

### Bei instabiler Leistung

- Empfehlung: Kontrollieren Sie die Sinterprozessparameter (z. B. Temperatur 1450–1550 °C, Argonatmosphäre) streng und stellen Sie eine Dichte von >99,5 % sicher. Verwenden Sie hochreine Rohstoffe (Wolframreinheit >99,9 %) und überprüfen Sie die Zusammensetzung mittels XRF oder ICP-AES.
- Lösung: Kombinieren Sie metallografische Analysen und SEM-EDS, um die Mikrostruktur zu überprüfen und die Pulverpartikelgröße und das Nickel-Eisen-Verhältnis (z. B. 90W-7Ni-3Fe) zu optimieren, um die Leistungskonsistenz zu verbessern. Wärmebehandlungen (z. B. Glühen, 800–1000 °C) können innere Spannungen eliminieren.

### In Bezug auf Biokompatibilitätsprobleme

- Empfehlung: Reduzieren Sie den Nickelgehalt (auf 2–5 %) oder verwenden Sie biokompatible Beschichtungen (z. B. DLC oder TiN), um die Freisetzung von Nickelionen zu reduzieren. Führen Sie vor der medizinischen Anwendung einen Biokompatibilitätstest nach ISO 10993 durch.
- Lösung: Oberflächenbehandlung mit chemischer Nickel- oder PVD-Beschichtung für verbesserte Korrosionsbeständigkeit und Biosicherheit. Entwicklung von nickelalternativen Bindephasen (z. B. Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen) für sensible medizinische Anwendungen.

### Für magnetische Störungen

- Empfehlung: Optimieren Sie die Legierungsformel, reduzieren Sie den Eisengehalt (auf 1–2 %) oder verwenden Sie stattdessen eine Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung, um den Magnetismus zu reduzieren.
- Lösung: Tragen Sie eine nichtmagnetische Beschichtung (z. B. DLC) oder eine Entmagnetisierungsbehandlung (z. B. Hochtemperaturglühen) auf, um die Magnetisierungsintensität zu reduzieren. Überprüfen Sie die magnetischen Eigenschaften nach der Produktion mit einem Vibrationsprobenmagnetometer (VSM), um die Einhaltung der Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit sicherzustellen.

### Für hohe Kosten

- Empfehlungen: Nutzen Sie umweltfreundliche Fertigungstechnologien (wie Plasma- oder

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mikrowellensintern), um den Energieverbrauch zu senken. Entwickeln Sie effiziente Recyclingtechnologien für das Recycling von Altlegierungen (wie z. B. Gegengewichten aus der Luftfahrt), um die Rohstoffkosten zu senken.

- Lösung: Einführung additiver Fertigungsverfahren (z. B. SLM) zur Herstellung komplexer Teile, um Materialabfall und Verarbeitungskosten zu reduzieren. Optimieren Sie die Lieferkette, diversifizieren Sie die Wolfram-Ressourcenquellen und reduzieren Sie die Risiken der Marktvolatilität.

**Umfassende Empfehlungen :** Hersteller sollten ein umweltfreundliches Produktionssystem gemäß den Umweltstandards ISO 14001 etablieren und durch die Kombination von Recyclingtechnologien eine Kreislaufwirtschaft fördern. Anwender müssen bei der Auswahl von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen die Anwendungsanforderungen (wie elektromagnetische Verträglichkeit oder Biokompatibilität) klären und gemeinsam mit Lieferanten Rezepturen und Prozesse optimieren, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Leistung und Kosten zu gewährleisten.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Eisen- Legierung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Anhang: Glossar zu Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen

Nachfolgend finden Sie ein Glossar mit Begriffen im Zusammenhang mit Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen in Tabellenform. Es enthält wichtige Begriffe und deren Definitionen aus den Bereichen Produktion, Leistung, Prüfung und Anwendung und soll dem Leser helfen, Fachbegriffe richtig zu verstehen und zu verwenden.

Der Begriff	Definition
<b>Hochdichte Legierung</b>	Eine Legierung mit Wolfram als Hauptbestandteil (üblicherweise 85–97 %) und Zusätzen von Nickel, Eisen und anderen Bindephasen. Sie hat eine hohe Dichte (16,5–18,75 g/cm <sup>3</sup> ) und hervorragende mechanische Eigenschaften. Sie wird häufig für Gegengewichte, Abschirmungen und militärische Anwendungen eingesetzt.
<b>Pulvermetallurgie</b>	Die Technologie der Herstellung metallischer Werkstoffe durch Mischen von Metallpulvern, Pressen und Hochtemperaturesintern wird zur Herstellung von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen eingesetzt, die eine hohe Dichte und gleichmäßige Mikrostruktur gewährleisten.
<b>Flüssigphasensintern</b>	Während des Sinterprozesses schmilzt die Bindephase (z. B. Nickel und Eisen) zu einer flüssigen Phase, die die Bindung der Wolframpartikel fördert. Der Sinterprozess wird üblicherweise bei 1450–1550 °C durchgeführt, um die Dichte der Legierung (> 99,5 %) zu erhöhen.
<b>Heißisostatisches Pressen</b>	Die Verdichtung der Legierung erfolgt bei hoher Temperatur (1200–1400 °C) und hohem Druck (100–200 MPa), um Porosität zu beseitigen und die mechanischen Eigenschaften und die Homogenität der Mikrostruktur zu verbessern.
<b>Zugfestigkeit</b>	Die maximale Widerstandsfähigkeit eines Materials gegen Bruch unter Zugbelastung. Die Zugfestigkeit einer Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung beträgt üblicherweise 800–1000 MPa, was auf ihre hohen Festigkeitseigenschaften hinweist.
<b>Verlängerung</b>	Der Prozentsatz der plastischen Verformung eines Materials vor dem Zugbruch. Die Dehnung einer Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung beträgt üblicherweise 10–20 %, was auf ihre Zähigkeit hinweist.
<b>Vickershärte</b>	Die Vickershärte von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen beträgt üblicherweise 250–400 HV, was ihre Verschleißfestigkeit widerspiegelt.
<b>Wärmeausdehnungskoeffizient</b>	Die Dimensionsänderungsrate des Materials bei Temperaturänderungen, der WAK der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung, beträgt $4,5\text{--}5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , was auf eine hervorragende Dimensionsstabilität hinweist.
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	Die Fähigkeit des Materials, Wärme zu leiten. Die Wärmeleitfähigkeit einer Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung beträgt 100–130 W/ m·K und eignet sich daher für Anwendungen zur Wärmeableitung bei hohen Temperaturen.
<b>Korrosionsbestand</b>	Die Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber chemischen Angriffen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>igkeit</b>	Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen profitieren von der Oxidationsbeständigkeit von Nickel und eignen sich gut für feuchte oder saure Umgebungen.
<b>Schwacher Ferromagnetismus</b>	Aufgrund ihres Eisengehalts (1–5 %) weist eine Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung einen leichten Magnetismus mit einer Sättigungsmagnetisierung von 0,1–0,3 T auf, die bei elektromagnetisch empfindlichen Anwendungen kontrolliert werden muss.
<b>Röntgenfluoreszenz</b>	Zerstörungsfreie Prüftechnologie zur Analyse der Legierungszusammensetzung, Überprüfung des Wolfram-, Nickel- und Eisengehalts mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2\%$ .
<b>Atomemissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma</b>	Hochpräzise Analyse der Legierungszusammensetzung zum Erkennen von Spurenverunreinigungen (wie Sauerstoff, Kohlenstoff).
<b>Rasterelektronenmikroskop</b>	Eine mikroskopische Technik zur Beobachtung der Mikrostruktur und Oberflächenmorphologie von Legierungen, oft kombiniert mit energiedispersiver Spektroskopie (EDS) zur Erkennung der Komponentenverteilung.
<b>Gegengewicht</b>	Komponenten aus hochdichten Materialien werden verwendet, um den Schwerpunkt oder das Gleichgewicht von Geräten anzupassen, beispielsweise Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt oder Gegengewichte für Gelenke chirurgischer Roboter.
<b>Panzerbrechender Kern</b>	Hochdichte, hochfeste Materialien wie Wolfram-Nickel-Eisen werden in militärischer Munition verwendet, um gepanzerte Ziele zu durchdringen.
<b>Strahlenschutz</b>	Die Verwendung von Materialien mit hoher Dichte zur Absorption von Röntgen- oder Gammastrahlen zum Schutz von Personal und Geräten ist in der medizinischen CT-/MRT-Ausrüstung und in der Kernenergiebranche üblich.
<b>Kollimator</b>	Wird aufgrund seiner hohen Dichte und Verarbeitbarkeit in Strahlentherapiegeräten verwendet, um die Richtung und Reichweite der Strahlen zu steuern.
<b>Additive Fertigung</b>	WNiFe- Bauteile werden Technologien zur Herstellung komplex geformter Bauteile durch schichtweises Aufbringen von Materialien (z. B. Selective Laser Melting, SLM) eingesetzt .
<b>Kreislaufwirtschaft</b>	Die Recyclingtechnologie der Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung unterstützt die nachhaltige Entwicklung des Wirtschaftsentwicklungsmodells, das Abfall durch Recycling, Wiederverwendung und Ressourcenkreislauf reduziert.
<b>Grüne Fertigung</b>	Setzen Sie umweltfreundliche Verfahren und Technologien (wie die Aufbereitung von grünem Erz und Sintern bei niedrigen Temperaturen) zur Herstellung von Legierungen ein, um den Energieverbrauch und die Umweltverschmutzung zu senken.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Englische Literatur

- [1] ASTM International. (2015). ASTM B777-15: Standard-Spezifikation für Wolframbasis, hochdichtes Metall. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [2] ASTM International. (2018). ASTM E8/E8M-18: Standardprüfverfahren für die Zugprüfung metallischer Werkstoffe. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [3] ASTM International. (2019). ASTM E92-17: Standardprüfverfahren für die Vickershärte und Knoophärte metallischer Werkstoffe. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [4] ASTM International. (2016). ASTM A927/A927M-11: Standardprüfverfahren für magnetische Wechselstromeigenschaften von Ringkernproben mit der Voltmeter-Amperemeter-Wattmeter-Methode. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [5] ISO. (2004). ISO 20886:2004: Luftfahrt - Hochdichte Wolframlegierungen. Genf: Internationale Organisation für Normung.
- [6] ISO. (2015). ISO 9001:2015: Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen. Genf: Internationale Organisation für Normung.
- [7] ISO. (2015). ISO 14001:2015: Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung. Genf: Internationale Organisation für Normung.
- [8] ISO. (2018). ISO 10993-1:2018: Biologische Beurteilung von Medizinprodukten - Teil 1: Bewertung und Prüfung im Rahmen eines Risikomanagementprozesses. Genf: Internationale Organisation für Normung.
- [9] MIL-T-21014D. (1991). Militärische Spezifikation: Wolframbasismetall, hohe Dichte. Washington, DC: US-Verteidigungsministerium.
- [10] EN 10204:2004. (2004). Metallische Erzeugnisse - Arten von Prüfbescheinigungen. Brüssel: Europäisches Komitee für Normung.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT