

## Was sind Wolframlegierungsbleche

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## EINFÜHRUNG IN DIE CTIA GROUP

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

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

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

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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Inhaltsverzeichnis

### Kapitel Eins Grundlegendes Verständnis von Wolframlegierungsblechen

- 1.1 Konzept von Wolframlegierungsblechen
  - 1.1.1 Definition von Wolframlegierungsblechen
  - 1.1.2 Abgrenzung von verwandten Materialien
- 1.2 Bedeutung der Entwicklung und Forschung von Wolframlegierungsblechen
  - 1.2.1 Entwicklungskontext basierend auf der Nutzung von Wolframressourcen
  - 1.2.2 Bedeutung der Untersuchung von Wolframlegierungsblechen aus verfahrenstechnischer Sicht
  - 1.2.3 Status von Wolframlegierungsblechen in Anwendungsgebieten

### Kapitel Zwei Klassifizierungssystem für Wolframlegierungsbleche

- 2.1 Klassifizierung von Wolframlegierungsblechen nach Materialzusammensetzung
  - 2.1.1 Wolframlegierungsbleche der Nickel-Eisen-Serie
  - 2.1.2 Wolframlegierungsbleche der Nickel-Kupfer-Serie
  - 2.1.3 Wolfram-Kupfer-Legierungsbleche
  - 2.1.4 Wolfram-Silber-Legierungsbleche
  - 2.1.5 Andere Wolframlegierungsbleche mit Bindemittelphase
- 2.2 Klassifizierung von Wolframlegierungsblechen nach Kerneigenschaften
  - 2.2.1 Wolframlegierungsbleche hoher Dichte
  - 2.2.2 Hochharte Wolframlegierungsbleche
  - 2.2.3 Korrosionsbeständige und verschleißfeste Wolframlegierungsbleche
- 2.3 Klassifizierung von Wolframlegierungsblechen nach Größenspezifikationen
  - 2.3.1 Ultradünne Wolframlegierungsbleche (Dicke < 0,1 mm)
  - 2.3.2 Wolframlegierungsbleche mit üblicher Dicke (0,1-10 mm)
  - 2.3.3 Dickwandige Wolframlegierungsbleche (Dicke > 10 mm)
  - 2.3.4 Wolframlegierungsbleche in Sonderformen und -größen (kundenspezifisch)
- 2.4 Klassifizierung von Wolframlegierungsblechen nach Anwendungsszenarien
  - 2.4.1 Wolframlegierungsbleche für die nationale Verteidigung und die Rüstungsindustrie
  - 2.4.2 Wolframlegierungsbleche für die industrielle Fertigung
  - 2.4.3 Wolframlegierungsbleche für nukleare und medizinische Anwendungen
  - 2.4.4 Wolframlegierungsbleche für elektronische Informationen
  - 2.4.5 Andere spezialisierte Wolframlegierungsbleche

### Kapitel Drei: Legierungsprinzipien und Zusammensetzungssysteme von Wolframlegierungsblechen

- 3.1 Chemische Grundlagen der Legierungsbildung in Wolframlegierungsblechen
  - 3.1.1 Phasendiagrammanalyse von Wolfram mit anderen Metallelementen
  - 3.1.2 Chemische Mechanismen der Mischkristallverfestigung und Dispersionsverfestigung
  - 3.1.3 Bildungsbedingungen und Stabilität der Legierungsphasen
- 3.2 Rollen und Anteile der Bestandteile in Wolframlegierungsblechen
  - 3.2.1 Synergistischer Mechanismus des Nickel-Eisen-Systems in Wolframlegierungsblechen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.2.2 Synergistischer Mechanismus des Nickel-Kupfer-Systems in Wolframlegierungsblechen
- 3.2.3 Dotierungseffekte von Spurenelementen in Wolframlegierungsblechen
- 3.3 Chemische Regeln für die Zusammensetzungsauslegung von Wolframlegierungsblechen
  - 3.3.1 Leistungsorientierte Logik zur Optimierung der Zusammensetzung von Wolframlegierungsblechen
  - 3.3.2 Chemische Kontrollmethoden zur Erzielung einer gleichmäßigen Zusammensetzung von Wolframlegierungsblechen
  - 3.3.3 Einfluss von Verunreinigungselementen auf die Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen
  - 3.3.4 Verfahren zur Entfernung von Verunreinigungen in Wolframlegierungsblechen

## **Kapitel Vier: Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Wolframlegierungsblechen**

- 4.1 Mikrostruktur von Wolframlegierungsblechen
  - 4.1.1 Chemische Zusammensetzung der Kornstruktur und der Korngrenzen
  - 4.1.2 Verteilung und chemischer Zustand der Legierungsphasen
  - 4.1.3 Chemische Ursachen von Defektstrukturen
- 4.2 Eigenschaften und Wirkungsmechanismen von Wolframlegierungsblechen
  - 4.2.1 Chemisches Atompackungsprinzip für hohe Dichte in Wolframlegierungsblechen
  - 4.2.2 Chemischer Trägermechanismus der thermischen und elektrischen Leitfähigkeit in Wolframlegierungsblechen
  - 4.2.3 Chemische Strukturunterstützung für die thermische Stabilität von Wolframlegierungsblechen
- 4.3 Korrelation zwischen mechanischen und chemischen Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen
  - 4.3.1 Zusammenhang zwischen der Härte von Wolframlegierungsblechen und der chemischen Bindungsstärke
  - 4.3.2 Chemische Korrosionsbeständigkeit und Verschleißfestigkeitsmechanismus von Wolframlegierungsblechen
  - 4.3.3 Rolle der chemischen Oberflächenbarriere bei der Korrosionsbeständigkeit von Wolframlegierungsblechen
- 4.4 Analyse der Prozess-Struktur-Eigenschafts-Korrelationen in Wolframlegierungsblechen
  - 4.4.1 Regulierungsfunktion des Sinterprozesses für die Mikrostruktur von Wolframlegierungsblechen
  - 4.4.2 Einflussmechanismus des Walzprozesses auf die mechanischen Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen
  - 4.4.3 Optimierungspfad der Oberflächenbehandlung zur Verbesserung der chemischen Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen
- 4.5 Struktur- und Eigenschaftsverhalten von Wolframlegierungsblechen in speziellen Umgebungen
  - 4.5.1 Strukturelle Stabilitätsänderungen von Wolframlegierungsblechen in Hochtemperaturumgebungen
  - 4.5.2 Chemische Strukturbeständigkeit von Wolframlegierungsblechen in Strahlungsumgebungen
  - 4.5.3 Gesetzmäßigkeiten der Eigenschaftsentwicklung von Wolframlegierungsblechen unter extremem Druck
- 4.6 Sicherheitsdatenblatt für Wolframlegierungsbleche der CTIA GROUP LTD

## **Kapitel Fünf: Leistungsprüfung und Charakterisierungsverfahren für Wolframlegierungsbleche**

- 5.1 Analyseverfahren zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Wolframlegierungsblechen

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

- 5.1.1 Atomabsorptionsspektroskopie und Emissionsspektroskopie-Analyse von Wolframlegierungsblechen
- 5.1.2 Quantitative Methode zur Zusammensetzungsbestimmung von Wolframlegierungsblechen mittels Röntgenfluoreszenzspektroskopie
- 5.1.3 Chemische Titrationsanalyse von Spurenelementen in Wolframlegierungsblechen
- 5.2 Methoden zur Mikrostrukturcharakterisierung von Wolframlegierungsblechen
- 5.2.1 Rasterelektronenmikroskopische Morphologie- und Zusammensetzungskartierung von Wolframlegierungsblechen
- 5.2.2 Röntgenbeugungsphasen- und Kristallstrukturanalyse von Wolframlegierungsblechen
- 5.2.3 Transmissionselektronenmikroskopische Beobachtung mikroskopischer Defekte in Wolframlegierungsblechen
- 5.3 Prüfnormen für Leistungsindikatoren von Wolframlegierungsblechen
- 5.3.1 Prüfverfahren zur Bestimmung der Dichte und Kompaktheit von Wolframlegierungsblechen
- 5.3.2 Prüfverfahren zur Bestimmung der Härte von Wolframlegierungsblechen
- 5.3.3 Prüfverfahren zur Bestimmung der Korrosionsbeständigkeit von Wolframlegierungsblechen
- 5.3.4 Prüfverfahren zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit von Wolframlegierungsblechen
- 5.3.5 Prüfverfahren zur Bestimmung der Festigkeit von Wolframlegierungsblechen

## **Kapitel Sechs: Herstellungsverfahren für Wolframlegierungsbleche**

- 6.1 Herstellungsverfahren und Klassifizierung von Wolframlegierungsblechen
- 6.1.1 Wichtigste Herstellungsverfahren für Wolframlegierungsbleche
- 6.1.2 Prozessunterschiede zwischen hochdichten und nicht hochdichten Wolframlegierungsblechen
- 6.1.3 Typische Dickenbereiche und entsprechende Prozessauswahl (0,05 mm~50 mm)
- 6.2 Rohmaterialpulverherstellung
- 6.2.1 Herstellung und Qualitätsanforderungen an hochreines Wolframpulver
- 6.2.2 Auswahl und Vorbehandlung von Legierungselementpulvern (Ni, Fe, Cu, Co, Mo usw.)
- 6.2.3 Kontrolle der Pulverpartikelgrößenverteilung und Fisher-Partikelgrößenprüfung
- 6.2.4 Pulvermisch- und Legierungsverfahren
- 6.3 Pulverformverfahren
- 6.3.1 Kaltisostatisches Pressen
- 6.3.2 Optimierung der Press- und Druckparameter
- 6.3.3 Anwendung des Spritzgießens bei dünnen Blechzuschnitten
- 6.3.4 Grüne Festigkeitssteigerungs- und Entfettungsverfahren
- 6.4 Sinterprozesse
- 6.4.1 Vertikales Sinterverfahren unter Wasserstoffatmosphäre
- 6.4.2 Temperaturfenster und Haltezeitsteuerung beim Flüssigphasensintern
- 6.4.3 Vakuumsintern und integriertes Sinter-Heißisostatisches Pressverfahren
- 6.4.4 Sinterverformungskontrolle und Konstruktion von Stützwerkzeugen
- 6.4.5 Sicherstellung der Temperaturfeldhomogenität beim Sintern großformatiger Plattenrohlinge
- 6.5 Warmumformung und Wärmebehandlung
- 6.5.1 Blockschmieden und Warmwalzen
- 6.5.2 Mehrdirektionales Schmieden zur Verbesserung der Gewebehomogenität

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

- 6.5.3 Zwischenglühen und Spannungsarmglühen
- 6.5.4 Hochtemperatur-Lösungsglühen und Schnellkühlung
- 6.6 Kaltwalzen und Warmwalzen zur Herstellung dünner Bleche
  - 6.6.1 Gesamtumformungsverteilung beim Kaltwalzen und Walzgradplan
  - 6.6.2 Anwendung des Warmwalzens bei Legierungen mit hohem Wolframgehalt
  - 6.6.3 Steuerung der Rollrichtung und Optimierung der Textur
  - 6.6.4 Verfahren zur Vermeidung von Kantenrissen und zum Beschneiden
- 6.7 Oberflächenbehandlung und Veredelung
  - 6.7.1 Chemische Reinigung und Beizen zur Entfernung von Oxidschichten
  - 6.7.2 Alkalische Reinigung zur Entfernung der Bindemittelphasen-Oberflächenanreicherung
  - 6.7.3 Mechanisches Schleifen und Polieren
  - 6.7.4 Heißnivellierungsverfahren mit Vakuum-/Wasserstoffschutz
  - 6.7.5 Präzisionsscheren, Laserschneiden und Wasserstrahlschneiden

## **Kapitel Sieben: Anwendungen von Wolframlegierungsblechen**

- 7.1 Anwendungen von Wolframlegierungsblechen im Bereich der nationalen Verteidigung und des Militärs
  - 7.1.1 Wolframlegierungsbleche für panzerbrechende Munition
  - 7.1.2 Wolframlegierungsbleche für Gegengewichte
  - 7.1.3 Wolframlegierungsbleche zum Schutz
- 7.2 Anwendungen von Wolframlegierungsblechen in der High-End-Fertigung
  - 7.2.1 Wolframlegierungsbleche für Formeinsätze
  - 7.2.2 Wolframlegierungsbleche für Schneidwerkzeuge
  - 7.2.3 Wolframlegierungsbleche für mechanische Gegengewichte
- 7.3 Anwendungen von Wolframlegierungsblechen im Nuklear- und Medizinbereich
  - 7.3.1 Wolframlegierungsbleche für die nukleare Abschirmung
  - 7.3.2 Wolframlegierungsbleche für medizinische Abschirmungen
  - 7.3.3 Wolframlegierungsbleche für nukleare Umgebungen
- 7.4 Anwendungen von Wolframlegierungsblechen in der Elektronik und im Bereich neuer Energien
  - 7.4.1 Wolframlegierungsbleche für Wärmeableitungssubstrate
  - 7.4.2 Wolframlegierungsbleche für die Elektronikverpackung
  - 7.4.3 Wolframlegierungsbleche für Elektroden
- 7.5 Anwendungen von Wolframlegierungsblechen in Karten
  - 7.5.1 Bankkarten und Zahlungskarten aus Wolframlegierung
  - 7.5.2 Haustier-Identifikationsetiketten aus Wolframlegierung
  - 7.5.3 Individuell gestaltete Festival- und Gedenkkarten aus Wolframlegierung
  - 7.5.4 Wolframlegierungen – Industrie- und Anlagenmanagement-Tags
  - 7.5.5 Anhänger aus Wolframlegierung für Kleidung und Luxusartikel
  - 7.5.6 Hochwertige Visitenkarten und Benimmkarten aus Wolframlegierung

## **Kapitel Acht Häufige Probleme und Lösungen für Wolframlegierungsbleche**

- 8.1 Grundlagenprobleme und Lösungen für Wolframlegierungsbleche

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



- 8.1.1 Probleme im Zusammenhang mit Zusammensetzung und Struktur
  - 8.1.1.1 Probleme ungleichmäßiger Zusammensetzung in Wolframlegierungen und Homogenisierungsverfahren
  - 8.1.1.2 Arten von Kristallstrukturdefekten und Reparaturstrategien
- 8.1.2 Probleme mit Abweichungen der physikalischen Eigenschaften bei Wolframlegierungsblechen
  - 8.1.2.1 Ursachen und Korrekturverfahren für anormale Dichte und Härte
  - 8.1.2.2 Probleme mit unpassender Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnung sowie Optimierungslösungen
- 8.2 Produktions- und Fertigungsprobleme und -lösungen für Wolframlegierungsbleche
  - 8.2.1 Probleme im pulvermetallurgischen Prozess
    - 8.2.1.1 Identifizierung und Kontrollmaßnahmen für Mängel bei der Pulverherstellung
    - 8.2.1.2 Diagnose und Prozessverbesserung bei Sinterprozessfehlern
  - 8.2.2 Probleme beim Walzen und Umformen
    - 8.2.2.1 Ursachen und Präventionsmethoden für Warmwalzrisse
    - 8.2.2.2 Analyse und Umformkontrolle von Kaltumformungsproblemen
  - 8.2.3 Probleme bei der Qualitätsprüfung und -kontrolle
    - 8.2.3.1 Anwendungsschwierigkeiten der zerstörungsfreien Prüftechnik und alternative Lösungen
    - 8.2.3.2 Umgang mit Maßtoleranzabweichungen und Verbesserung der Präzision
- 8.3 Anwendungs- und Leistungsprobleme und Lösungen für Wolframlegierungsbleche
  - 8.3.1 Anwendungsprobleme von Wolframlegierungsblechen in der Luft- und Raumfahrt
    - 8.3.1.1 Mechanismen des Hochtemperatur-Ermüdungsversagens und Verstärkungsmaßnahmen
    - 8.3.1.2 Probleme der Schwingungs- und Stoßbelastungen und stoßfeste Konstruktion
  - 8.3.2 Anwendungsprobleme von Wolframlegierungsblechen in der Strahlenabschirmung
    - 8.3.2.1 Ursachen für die Dämpfung und Wiederherstellung der Schirmdämpfung
    - 8.3.2.2 Bewertung von Biokompatibilitätsrisiken und Sicherheitsverbesserungen
  - 8.3.3 Anwendungsprobleme von Wolframlegierungsblechen in der Elektronik und Medizintechnik
    - 8.3.3.1 Fehlersuche bei anormaler Leitfähigkeit und Magnetismus sowie Materialmodifikation
    - 8.3.3.2 Schutz vor Korrosions- und Oxidationsproblemen und Beschichtungstechnologie

#### Anhänge:

- Anhang A Chinesische Normen für Wolframlegierungsbleche
  - Anhang B Internationale Normen für Wolframlegierungsbleche
  - Anhang C Normen für Wolframlegierungsbleche in Europa, Amerika, Japan, Korea und anderen Ländern
  - Anhang D Terminologietabelle für Wolframlegierungsbleche
- Referenzen.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsbleche

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

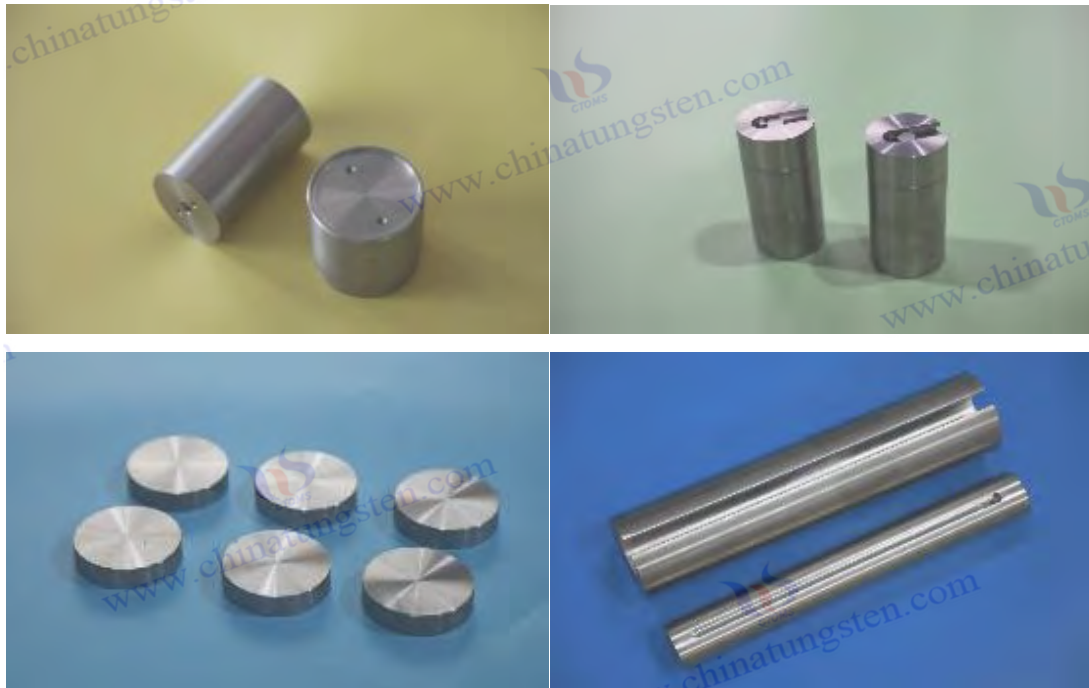
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

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



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Kapitel 1: Grundlegendes Verständnis von Wolframlegierungsblechen

### 1.1 Das Konzept der Wolframlegierungsbleche

Wolframlegierungsbleche sind Werkstoffe, deren Hauptbestandteil Wolfram ist. Sie werden legiert und zu dünnen Blechen verarbeitet. Dieser Werkstoff spielt eine wichtige Rolle in industriellen Anwendungen, da er die hohe Dichte und den hohen Schmelzpunkt von Wolfram mit verbesserter Verarbeitbarkeit und optimierten mechanischen Eigenschaften durch die Zugabe anderer Elemente kombiniert. Die Entwicklung von Wolframlegierungsblechen hat es ermöglicht, Wolfram, ein zuvor schwer zu verarbeitendes Metall, in Blechform in verschiedenen technischen Anwendungen einzusetzen.

Wolframlegierungsbleche zeichnen sich typischerweise durch einen hohen Wolframgehalt aus, wobei weitere Elemente zur Optimierung der Gesamtleistung ausgewählt werden. Gängige Legierungssysteme umfassen Kombinationen von Wolfram mit Nickel, Eisen oder Kupfer, die beim Sintern eine Bindemittelphase bilden und so die Haftung der Wolframpartikel verbessern. Die Blechdicke wird je nach Herstellungsverfahren und Anwendungsanforderungen oft auf wenige Millimeter oder sogar bis in den Mikrometerbereich genau kontrolliert. Der Produktionsprozess beginnt mit dem Mischen des Pulvers, gefolgt von Pressen, Sintern, Warm- und Kaltverformung, wodurch schließlich Bleche mit glatten Oberflächen und geraden Kanten entstehen.

Wolframlegierungsbleche weisen eine gute Dichteverteilung auf und eignen sich daher hervorragend für Anwendungen, die ein konzentriertes Gewicht erfordern. Sie besitzen zudem eine gewisse Duktilität, was nachfolgende Biege-, Stanz- oder Schneidvorgänge erleichtert. Die Wärmebehandlung ist dabei von entscheidender Bedeutung; durch die Kontrolle von Temperatur und Abkühlgeschwindigkeit lassen sich Korngröße und Phasenverteilung des Materials gezielt einstellen und somit das Verhältnis von Härte und Zähigkeit beeinflussen.

Wolframlegierungsbleche verdeutlichen die umfassenden Anwendungsmöglichkeiten der Werkstofftechnik. Es geht nicht einfach nur darum, Wolfram dünner zu walzen, sondern vielmehr um die Legierung, um Sprödigkeit in Bearbeitbarkeit zu verwandeln. Dieser Werkstoff findet zunehmend Anwendung in der Elektronik, Medizintechnik und Präzisionsinstrumentenfertigung, da er die Anforderungen an Dimensionsstabilität und Umweltverträglichkeit erfüllt. Dank Fortschritten in Fertigungstechnologien wie Laserschneiden und Präzisionswalzen erweitert sich das Spektrum der Spezifikationen für Wolframlegierungsbleche stetig und deckt so vielfältige Konstruktionsanforderungen ab.

#### 1.1.1 Definition von Wolframlegierungsblechen

Wolframlegierungsbleche sind dünne, blattartige Legierungswerkstoffe, die aus Wolfram als Matrix und geringen Mengen anderer Metallelemente wie Nickel, Eisen oder Kupfer bestehen. Sie werden pulvermetallurgisch hergestellt und anschließend gewalzt. Wolfram ist typischerweise der Hauptbestandteil und verleiht dem Material seine grundlegenden Eigenschaften wie hohe Dichte und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Härte. Die Zugabe von Legierungselementen verbessert die Plastizität und Verarbeitbarkeit des Materials deutlich.

Per Definition liegt der Hauptunterschied zwischen Wolframlegierungsblechen und anderen Wolframprodukten in ihrer blechartigen Form und ihrer Legierungszusammensetzung. Im Herstellungsprozess wird Wolframpulver gleichmäßig mit anderen Metallpulvern vermischt und anschließend in flüssiger Phase bei hoher Temperatur gesintert, um ein dichtes Mikrogefüge zu erzeugen. Anschließend wird es durch mehrere Walzstiche schrittweise auf die gewünschte Dicke reduziert, begleitet von einem Glühprozess zum Abbau innerer Spannungen. Diese Definition beschreibt die vollständige Umwandlungskette des Materials vom Pulver bis zum fertigen Produkt.

Bei praktischen Definitionen muss auch die Klassifizierung von Legierungsreihen berücksichtigt werden. So betont beispielsweise die Wolfram-Nickel-Eisen-Reihe das Gleichgewicht der mechanischen Eigenschaften, während die Wolfram-Nickel-Kupfer-Reihe den Fokus stärker auf die elektrische Leitfähigkeit legt. Die Definitionen dieser Reihen basieren alle auf dem hohen Schmelzpunkt von Wolfram, der die Formstabilität des Materials bei hohen Temperaturen gewährleistet.

Wolframlegierungsbleche zeichnen sich auch durch ihre funktionale Positionierung aus; sie sind Hochleistungswerkstoffe, die sich für Anwendungen eignen, die eine Kombination aus hoher Dichte und guter Umformbarkeit erfordern. Diese Definition ist nicht statisch; durch die Erforschung neuer Legierungselemente, wie beispielsweise die Zugabe von Molybdän oder Rhenium, wird sie stetig erweitert, um sich an neue Anwendungsbereiche anzupassen.

### 1.1.2 Definition und Abgrenzung zu verwandten Materialien

Wolframlegierungsbleche aus anderen Werkstoffen erfordern eine Analyse aus verschiedenen Perspektiven, darunter Zusammensetzung, Verarbeitungsverfahren, Leistungseigenschaften und Anwendungsbereich, um Verwechslungen bei der Materialauswahl zu vermeiden.

Der wichtigste Aspekt ist der Vergleich mit reinen Wolframblechen. Reine Wolframbleche enthalten nahezu keine Legierungselemente und werden durch Walzen von hochreinem Wolframpulver hergestellt. Aufgrund der Sprödigkeit von Wolfram bei Raumtemperatur muss die Verarbeitung jedoch bei hohen Temperaturen erfolgen, wodurch das Endprodukt rissanfällig wird. Wolframlegierungsbleche hingegen enthalten durch Legierung eine Bindemittelphase, die ein Walzen bei niedrigeren Temperaturen ermöglicht. Dies führt zu einer höheren Oberflächenqualität und Eignung für ein breiteres Spektrum an Umformprozessen.

Wolfram-Kupfer-Verbundbleche bedürfen ebenfalls einer Unterscheidung. Dieses Material ist hauptsächlich ein mechanisches Gemisch aus Wolframpartikeln und Kupferphasen mit hohem Kupferanteil und wird mittels Schmelzinfiltration und nicht durch Legierungssintern hergestellt. Im Gegensatz dazu bilden Wolframlegierungsbleche eine Mischkristallstruktur mit gleichmäßigerer

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mischbarkeit zwischen Kupfer bzw. Eisen und Nickel, was zu Unterschieden im Wärmeausdehnungskoeffizienten und der Wärmeleitfähigkeit führt.

Molybdänlegierungsbleche werden häufig zum Vergleich herangezogen. Molybdän hat eine geringere Dichte und einen niedrigeren Schmelzpunkt als Wolfram, und seine Bleche eignen sich gut für Vakuumumgebungen, ihre Hochtemperaturfestigkeit ist jedoch nicht so hoch wie die von Wolframlegierungsblechen. Molybdänbleche sind besser für elektronische Vakuumgeräte geeignet, während Wolframlegierungsbleche in Anwendungen mit höherer Massenträgheit vorteilhafter sind.

Im Vergleich zu Hartmetallblechen enthalten Wolframlegierungsbleche keine Karbidphasen. Hartmetallbleche bestehen hauptsächlich aus Wolframkarbidpartikeln und Kobaltbindemitteln, weisen eine extrem hohe Härte, aber eine begrenzte Zähigkeit auf und werden vorwiegend für Schneidwerkzeuge eingesetzt. Wolframlegierungsbleche hingegen zeichnen sich durch ein ausgewogenes Verhältnis von Dichte und Duktilität aus und eignen sich daher für Ausgleichsbauteile oder Abschirmungen.

Diese Definitionen verdeutlichen die Stellung von Wolframlegierungsblechen: Es handelt sich um Bleche, die Dichte, Verarbeitbarkeit und Stabilität optimal vereinen und spezifische Leistungslücken in zivilen Industrien schließen. Diese Unterscheidung hilft Ingenieuren, die passenden Werkstoffe für die jeweiligen Anforderungen auszuwählen.

## **1.2 Die Entwicklung und Forschungsbedeutung von Wolframlegierungsblechen**

Wolframlegierungsbleche haben eine umfassende Entwicklung durchlaufen – von der Fokussierung auf einzelne Leistungseigenschaften hin zur Optimierung umfassender Eigenschaften. Diese Entwicklung wird sowohl durch die Eigenschaften der Wolframressourcen und Fortschritte in der Verarbeitungstechnologie als auch durch den kontinuierlichen industriellen Bedarf an hochdichten und hochstabilen Werkstoffen vorangetrieben. Frühe Wolframwerkstoffe traten hauptsächlich in einfachen Formen wie Drähten und Sputtertargets auf. Mit der Verbesserung pulvermetallurgischer Verfahren und den steigenden Anforderungen an die Bearbeitbarkeit hochdichter Werkstoffe entwickelten sich Wolframlegierungsbleche allmählich zu einem eigenständigen Forschungs- und Produktionsgebiet. Mitte bis Ende des 20. Jahrhunderts bot die ausgereifte Flüssigphasensinterstechnologie ein zuverlässiges Verfahren zur Verdichtung von Wolframlegierungen. Die anschließende Einführung von Mehrfachwalz- und kontrollierten Glühprozessen ermöglichte die Transformation von massiven zu dünnen Blechen. Dieser Prozess erweiterte nicht nur die Anwendungsbereiche von Wolfram, sondern legte auch den Grundstein für die spätere Funktionalisierung und den Leichtbau.

### **1.2.1 Entwicklungskontext basierend auf der Nutzung von Wolframressourcen**

Als strategisches Metall mit relativ begrenzten Reserven, aber weit verbreiteter Verfügbarkeit, war die effiziente Nutzung von Wolfram schon immer ein wichtiger Aspekt der Materialentwicklung. Frühere Wolframvorkommen wurden hauptsächlich für die Hartmetallproduktion verwendet, während die

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

verbleibenden minderwertigen Erze oder Recyclingmaterialien schwer weiterzuverarbeiten waren. Die Entwicklung von Wolframlegierungsblechen hat einen neuen Verwertungsweg für mittel- und minderwertige Wolframvorkommen eröffnet und ermöglicht es, zuvor potenziell ungenutztes Wolframpulver in hochwertige Anwendungsbereiche zu integrieren.

Um 1950 entdeckten Forscher, dass die Zugabe von Ferronickel oder Kupfernicket die Spröbruchtemperatur von Wolfram deutlich senken kann. Diese Entdeckung führte direkt zur Entwicklung der ersten Generation von Wolfram-Schwermetalllegierungen, die vorwiegend in massiver Form für zivile Ausgleichsbauteile verwendet wurden. Mit der Weiterentwicklung der Walzpräzision und der Glühprozesse konnte die Dicke schrittweise von anfänglich einem Zentimeter über einen Millimeter bis hin zu wenigen zehn Mikrometern reduziert werden, wodurch sich die Ressourcennutzung von extensiv zu intensiv verlagerte. Im 21. Jahrhundert hat die industrielle Anwendung fortschrittlicher Sintertechnologien wie Heißisostatisches Pressen und Funkenplasmasintern die Rohlingsdichte und die Mikrostrukturhomogenität weiter verbessert, die Anzahl der nachfolgenden Walzstiche reduziert und den Energieverbrauch sowie die Wolframverluste gesenkt.

In den letzten Jahren hat sich die Produktion von Wolframlegierungsblechen zunehmend auf das Ressourcenrecycling im gesamten Prozess konzentriert. So können beispielsweise Materialreste, Walzzunder und Ausschussteile aus der Wolframlegierungsverarbeitung durch Wasserstoffreduktion oder Zinkschmelzen zu hochreinem Wolframpulver zurückgeführt und anschließend wieder in den Mischprozess eingespeist werden. Dadurch entsteht ein weitgehend geschlossener Kreislauf. Gleichzeitig versuchen einige Forschungseinrichtungen angesichts sinkender Wolframvorkommen, den Wolframgehalt zu reduzieren oder teilweise durch Molybdän oder Tantal zu ersetzen, ohne die Leistungsfähigkeit zu beeinträchtigen. So entsteht ein ressourcenschonendes Legierungssystem. Die Entwicklung von Wolframlegierungsblechen spiegelt somit die Evolution der Wolframressourcen von einem verbrauchsintensiven Modell mit hoher Reinheit hin zu einem effizienten, zirkulären Nutzungsmodell wider. Dieser Prozess trägt sowohl dem technologischen Fortschritt als auch den Anforderungen einer nachhaltigen Entwicklung Rechnung.

### 1.2.2 Wolframlegierungsbleche aus verfahrenstechnischer Sicht

Aus verfahrenstechnischer Sicht verkörpert die Forschung und Entwicklung von Wolframlegierungsblechen die ingenieurtechnischen Lösungen für zentrale Probleme wie Mehrphasenreaktionen, Phasengrenzflächenkontrolle und die Optimierung von Wärme- und Stofftransport. Das Flüssigphasensintern in der Pulvermetallurgie ist ein typischer Verfahrensschritt der Verfahrenstechnik, der die Umlagerung von Wolframpartikeln, die Benetzung und Ausbreitung der Bindemittelphase, Lösungs- und Wiederausfällungsmechanismen sowie die Kinetik der Gasabfuhr umfasst. Forscher haben durch die Anpassung von Parametern wie Sintertemperaturprofilen, Wasserstofftaupunkt und Rohlingbeladungsmethoden eine präzise Kontrolle über Porosität, Bindemittelphasenverteilung und Sphäroidisierung der Wolframpartikel erreicht. Dies ist im Wesentlichen eine interdisziplinäre Anwendung von Verfahrenstechnik und Materialwissenschaft.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Walz- und Glühprozesse beinhalten die Kopplung von Spannungs- und Diffusionsfeldern. Finite-Elemente-Simulationen und Methoden der numerischen Strömungsmechanik, die in der Verfahrenstechnik häufig Anwendung finden, werden umfassend eingesetzt, um die Temperatur- und Spannungsverteilung beim Walzen sowie das Diffusionsverhalten der Elemente während des Glühens zu analysieren. Dies trägt zur Optimierung der Walzstichzahl und der Zwischenglühprozesse bei und reduziert Defekte wie Kantenablösungen und Rissbildung. Darüber hinaus sind Oberflächenbehandlungen wie stromloses Abscheiden und Vakuumwärmebehandlung typische Verfahrensschritte der Verfahrenstechnik, die die Oxidationsbeständigkeit und die Haftfestigkeit des Blechmaterials direkt beeinflussen.

Darüber hinaus liefert die Forschung zum Verhalten von Wolframlegierungsblechen in korrosiven Medien wichtige Referenzdaten für die Materialauswahl in chemischen Anlagen. Mittels elektrochemischer Tests und Immersionsversuchen haben Forscher Korrosionsratenmodelle für verschiedene Legierungssysteme in sauren, alkalischen und salzhaltigen Umgebungen entwickelt und damit eine theoretische Grundlage für die Verlängerung der Lebensdauer und die Reduzierung der Wartungskosten geschaffen. Aus verfahrenstechnischer Sicht sind Wolframlegierungsbleche nicht nur das Endprodukt, sondern auch das Ergebnis einer hochintegrierten Reihe präziser und kontrollierbarer chemischer und physikalischer Prozesse. Ihr Forschungswert liegt in der Bereitstellung reproduzierbarer Erfahrungen für die Skalierung ähnlicher hochschmelzender, mehrphasiger Werkstoffe.

### 1.2.3 Der Status von Wolframlegierungsblechen in Anwendungsgebieten

Wolframlegierungsbleche haben sich aufgrund der hohen Dichte und guten Bearbeitbarkeit einen unverzichtbaren Platz in der modernen Industrie erobert. Im Bereich der Medizintechnik sind sie mit ihren hervorragenden Strahlungsdämpfungseigenschaften und ihrer Biokompatibilität zum bevorzugten Werkstoff für Kernkomponenten wie Kollimatoren und Lamellengitter in High-End-Strahlentherapiegeräten geworden. Ihre Dickenpräzision und Oberflächenqualität beeinflussen die Genauigkeit der Behandlungspositionierung.

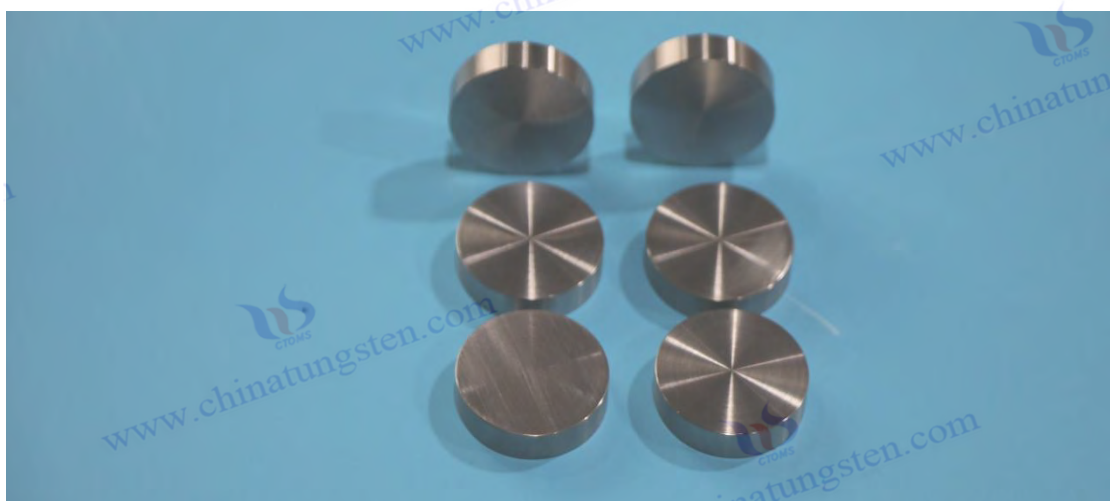
In der Präzisionsinstrumenten- und Elektronikindustrie werden Wolframlegierungsbleche aufgrund ihrer hohen Dichte und moderaten Leitfähigkeit als Schwingungsdämpfungskomponenten und elektromagnetische Abschirmungselemente eingesetzt. In Analysegeräten, hochpräzisen Waagen, Trägheitsnavigationssystemen und anderen Geräten tragen Wolframlegierungsbleche dazu bei, ein Gleichgewicht zwischen Miniaturisierung und hoher Stabilität zu erzielen.

Darüber hinaus gewinnen Wolframlegierungsbleche zunehmend an Bedeutung in der Vakuumbeschichtung und im Wärmemanagement. Als Trägermaterial oder Kühlkörper für Sputtertargets vereinen sie hohe Wärmeleitfähigkeit und geringe Wärmeausdehnung. Mit der rasanten Entwicklung neuer Energien und der Informationstechnologie der nächsten Generation ist der Bedarf an leistungstarken Wärmeleit- und Abschirmmaterialien in den letzten Jahren stetig gestiegen. Wolframlegierungsbleche mit ihrer einzigartigen Kombination von Eigenschaften finden daher zunehmend Anwendung in neuen Bereichen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Es ist wichtig zu beachten, dass Wolframlegierungsbleche nicht isoliert, sondern in Kombination mit anderen Hochleistungswerkstoffen eingesetzt werden. In einigen Fällen werden sie zusammen mit Titanlegierungen und Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen verwendet, um ein optimales Verhältnis zwischen geringem Gewicht und Funktionalität zu erzielen. Diese Fähigkeit, wichtige Funktionen eigenständig zu erfüllen und gleichzeitig mit anderen Materialien zusammenzuarbeiten, hat Wolframlegierungsblechen eine feste Position im Spektrum moderner Industriewerkstoffe gesichert. Mit weiteren Verbesserungen in der Verarbeitungsgenauigkeit und den Oberflächenbehandlungstechnologien bieten ihre Anwendungsbereiche noch erhebliches Erweiterungspotenzial.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsbleche

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Kapitel Zwei: Klassifizierungssystem für Wolframlegierungsbleche

### 2.1 Wolframlegierungsbleche nach Materialzusammensetzung

Die Klassifizierung von Wolframlegierungsblechen nach ihrer Materialzusammensetzung ist die gebräuchlichste und intuitivste Methode. Diese Klassifizierung spiegelt die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der Bindemittelphase wider und bestimmt somit die systematischen Unterschiede in den mechanischen, thermophysikalischen und elektromagnetischen Eigenschaften sowie der Verarbeitbarkeit. Heutzutage wird in fast allen industriell gefertigten Wolframlegierungsblechen Nickel als Hauptbindemittel verwendet, da Nickel eine gute Benetzbarkeit von Wolfram, ein moderates Aktivierungssintervermögen und eine geringe thermische Ausdehnungsdifferenz zu Wolfram aufweist. Basierend auf den verschiedenen zweiten Komponenten haben sich zwei Hauptreihen herausgebildet: Nickel-Eisen und Nickel-Kupfer. Daneben gibt es geringe Mengen an Nickel- Molybdän, Nickel-Rhenium und anderen experimentellen Systemen, die jedoch noch nicht die Massenproduktion von Blechen erreicht haben. Der Wolframgehalt der beiden Hauptsysteme liegt üblicherweise zwischen 90 % und 97 %, und der Gesamtanteil der Bindemittelphase wird zwischen 3 % und 10 % kontrolliert. Durch die Feinabstimmung des Verhältnisses und der thermomechanischen Verarbeitungsparameter lassen sich die Endprodukteigenschaften in einem weiten Bereich steuern.

#### 2.1.1 Blech aus Nickel-Eisen-Wolfram-Legierung

Nickel-Eisen-Wolfram-Legierungsbleche waren die ersten industriell gefertigten Wolframlegierungsbleche und dominieren bis heute den Markt. Ihre typische Zusammensetzung liegt zwischen 90 % und 97 % W, 2,5 % und 7 % Ni und 0,5 % und 3 % Fe, wobei das Massenverhältnis von Ni zu Fe üblicherweise zwischen 7:3 und 8:2 liegt. Dieses Verhältnis basiert auf umfangreichen experimentellen Untersuchungen Mitte des 20. Jahrhunderts, die zeigten, dass sich in diesem Bereich während des Flüssigphasensinterns eine ausreichende Menge an flüssiger Phase bildet. Dies fördert eine ausreichende Umlagerung der Wolframpartikel und verhindert gleichzeitig eine übermäßige Agglomeration der Bindemittelphase oder die Bildung spröder Phasen.

Das Nickel-Eisen-System zeichnet sich dadurch aus, dass die Binderphase eine Eisen-Nickel-Mischkristallphase mit ausgeprägtem Ferromagnetismus darstellt, was zu einer starken magnetischen Gesamtreaktion des Materials führt. Diese Eigenschaft bietet einen natürlichen Vorteil in Anwendungen, die magnetische Abschirmung oder Magnetaktuierung erfordern. Gleichzeitig reduziert die Zugabe von Eisen die Stapelfehlerenergie der Binderphase signifikant, wodurch der Lösungs- und Wiederausfällungsprozess in den späteren Sinterphasen gefördert wird. Dies führt zu einer kugelförmigeren Form der Wolframpartikel und somit zu einer höheren Grenzflächenhaftung zwischen Wolfram und Binderphase. Makroskopisch äußert sich dies in einer höheren Zugfestigkeit und Bruchzähigkeit.

Bei der Blechverarbeitung weisen Nickel-Eisen-Systeme gute thermoplastische Eigenschaften und Kaltverformbarkeit auf. Nach dem Hochtemperatursintern kann der Rohling mehrfach bei 1100–1300 °C

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

warmgewalzt und anschließend durch Zwischenglühen und Kaltwalzen auf eine Dicke von unter 0,05 mm reduziert werden. Kantenrisse treten beim Walzen seltener auf, was zu einer hohen Ausbeute führt. Die Wärmebehandlung beeinflusst die Endprodukteigenschaften maßgeblich: Niedrigtemperaturlühen über einen längeren Zeitraum erhält die feinen Wolframpartikel und die Faserstruktur und führt zu höherer Festigkeit; Hochtemperaturlühen über einen kürzeren Zeitraum fördert die Vergröberung der Wolframpartikel und die Homogenisierung der Bindemittelphase, wodurch die Duktilität verbessert wird. Nickel-Eisen-Wolfram-Legierungsbleche lassen sich hinsichtlich der Oberflächenbehandlung leicht stromlos mit Nickel, Gold oder Silber beschichten und können zudem im Vakuum diffusionsgeschieden werden, um eine Schutzschicht zu bilden und so ihre Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit weiter zu verbessern. Diese Bleche finden derzeit breite Anwendung in zivilen Präzisionsbauteilen, die sowohl eine hohe Dichte als auch eine gewisse mechanische Zuverlässigkeit erfordern, wie beispielsweise Gewichte für hochwertige Analysenwaagen, Waagenblöcke für Trägheitsinstrumente und Schwingungsdämpfungsbleche für optische Instrumente. Dank Fortschritten bei Walzanlagen und Wärmebehandlungstechnologien erreichen die Bleche eine Dickengleichmäßigkeit und Planheit im Mikrometerbereich und erfüllen damit die strengen Anforderungen von High-End-Instrumenten an minimale Qualitätsabweichungen.

### 2.1.2 Blech aus Nickel-Kupfer-Wolfram-Legierung

Nickel-Kupfer-Wolfram-Legierungsbleche sind nichtmagnetische Wolframlegierungsbleche, die aus Nickel-Eisen-Legierungen hergestellt werden. Ihre typische Zusammensetzung beträgt 90–96 % W, 3–8 % Ni und 1–5 % Cu, wobei das Massenverhältnis von Ni zu Cu typischerweise zwischen 3:1 und 7:3 liegt. Durch die Zugabe von Kupfer wird der makroskopische Ferromagnetismus des Materials vollständig eliminiert, wodurch es sich ideal für Umgebungen mit starken Magnetfeldern oder hohen Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit eignet. Gleichzeitig verleiht die hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit von Kupfer diesen Blechen eine hervorragende Wärmeleitfähigkeit und optimale elektrische Kontakteigenschaften.

Aus mikroskopischer Sicht ist die Binderphase im Nickel-Kupfer-System ebenfalls eine kubisch-flächenzentrierte Mischkristallphase. Aufgrund der unendlichen Mischbarkeit von Kupfer und Nickel weist die Binderphase jedoch eine höhere Zusammensetzungshomogenität auf. Die Temperatur des Phasenaustritts während des Sinterns ist etwas niedriger als im Nickel-Eisen-System, was die Sintertemperatur senkt und das unkontrollierte Wachstum von Wolframpartikeln reduziert. Der Sphäroidisierungsgrad der Wolframpartikel ist im Allgemeinen höher als im Nickel-Eisen-System, was zu einer höheren Reinheit der Grenzflächen führt. Dies bedingt häufig eine etwas höhere Dehnung bei gleichem Wolframgehalt, jedoch eine geringfügig niedrigere Zugfestigkeit, was einen Kompromiss zwischen Festigkeit und Plastizität widerspiegelt.

Nickel-Kupfer-Legierungen sind hinsichtlich ihrer Verarbeitungseigenschaften oxidationsanfälliger. Hochtemperaturwalzen muss unter Schutzgasatmosphäre oder im Vakuum erfolgen; andernfalls bildet sich leicht eine lose Oxidschicht auf der Oberfläche, die das nachfolgende Kaltwalzen beeinträchtigt. Die Kaltverfestigungsrate ist etwas geringer als die von Nickel-Eisen-Legierungen, wodurch sie sich für das

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Hochreduktionswalzen eignen und vorteilhaft für die Herstellung ultradünner Folien (Dicken bis zu 20  $\mu\text{m}$ ) sind. Das Glühfenster ist groß, und das Material ist nicht überhitzungsempfindlich, was kontinuierliche Produktionslinien ermöglicht.

Nickel-Kupfer-Legierungen weisen aufgrund ihrer von Natur aus guten Korrosionsbeständigkeit und elektrischen Kontakteigenschaften eine hohe Oberflächenbehandlungsfähigkeit auf. Oftmals genügt es, die gewünschten Eigenschaften durch einfaches Polieren oder eine leichte chemische Reinigung zu erzielen, wodurch aufwendige Beschichtungsverfahren entfallen. Anwendungsbereiche dieser Bleche sind vor allem Kollimatorlamellen für medizinische Strahlentherapiegeräte, elektromagnetische Abschirmabdeckungen, Target-Rückplatten für Vakuum-Sputteranlagen, Kühlkörper und weitere Anwendungen, die nichtmagnetische Eigenschaften, hohe Wärmeleitfähigkeit oder hohe elektrische Leitfähigkeit erfordern. Angesichts des steigenden Bedarfs an Wärmeableitung in der 5G-Kommunikation und bei Hochleistungselektronikgeräten haben sich die Anwendungen von dünnen Nickel-Kupfer-Wolfram-Legierungsblechen in den letzten Jahren rasant entwickelt und belegen deren großes Potenzial.

### 2.1.3 Wolfram-Kupfer-Legierungsblech

Wolfram-Kupfer-Legierungsbleche nehmen im Klassifizierungssystem eine Sonderstellung ein. Genau genommen zählen sie eher zu den Pseudolegierungen oder Metallmatrix-Verbundwerkstoffen als zu den Wolfram-Mischkristalllegierungen im herkömmlichen Sinne. Die typische Zusammensetzung liegt zwischen 50 % und 90 % W und 10 % und 50 % Cu, wobei die beiden Phasen nahezu unmischbar sind. Kupfer ist in einem kontinuierlichen oder semikontinuierlichen Netzwerk innerhalb des Wolframgerüsts verteilt. Aufgrund des Fehlens einer Legierungsbindemittelphase unterscheiden sich Wolfram-Kupfer-Bleche grundlegend von den zuvor genannten Wolfram-Legierungsblechen auf Nickelbasis hinsichtlich Mikrostruktur, Leistungseigenschaften und Verarbeitungsverfahren.

Wolfram-Kupfer-Bleche werden hauptsächlich entweder durch Schmelzinfiltration oder durch direktes Aktivierungssintern hergestellt. Bei der Schmelzinfiltration wird zunächst ein poröses Wolframgerüst gepresst und gesintert. Anschließend dringt geschmolzenes Kupfer bei einer Temperatur knapp über dem Schmelzpunkt von Kupfer in die Poren ein. Beim Aktivierungssintern hingegen wird dem Wolframpulver eine geringe Menge Nickel oder Kobalt beigemischt und dieses in einem einzigen Schritt bei 1300–1400 °C direkt verdichtet. Beide Verfahren erzeugen Bleche mit extrem hoher thermischer und elektrischer Leitfähigkeit, typischerweise zwischen 180 und 220 W/(m · K), wobei die elektrische Leitfähigkeit 40–55 % IACS erreicht. Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist gut mit dem von Halbleitermaterialien abgestimmt.

Bei der Blechverarbeitung weist Wolframkupfer aufgrund der Kupferphase hervorragende Warm- und Kaltverformungseigenschaften auf. Sorten mit einem Wolframgehalt von 70–80 % lassen sich bei Raumtemperatur direkt mit hohen Reduktionen walzen und erreichen so problemlos eine Enddicke von unter 0,1 mm mit hoher Oberflächengüte und nahezu ohne Zwischenglühen. Bei einem Wolframgehalt von über 85 % sind Warmwalzen und eine Schutzgasatmosphäre erforderlich. Die herausragendsten

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Vorteile von Wolframkupferblechen sind ihre nichtmagnetischen Eigenschaften, ihre ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit und ihre hohe Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion. Daher finden sie breite Anwendung in zivilen und industriellen Bereichen, wo Hochspannungskontakte, Vakuumschaltelektroden, Widerstandsschweißelektroden, Kühlkörper für elektronische Gehäuse und Düsenauskleidungen für Raketentriebwerke gleichzeitig Beständigkeit gegen hohe Temperaturen, Lichtbögen und Temperaturschocks erfordern. In den letzten Jahren haben sich ultradünne Wolfram-Kupfer-Bleche mit hohem Wolframgehalt aufgrund des explosionsartigen Anstiegs der Nachfrage nach Wärmeableitung in Hochleistungs-IGBT-Modulen und Halbleitersubstraten der dritten Generation zu einem Forschungs- und Produktionsschwerpunkt entwickelt.

#### 2.1.4 Wolfram-Silber-Legierungsblech

Wolfram-Silber-Legierungsbleche gehören ebenfalls zu einem Pseudo-Legierungssystem, wobei Silber eine weiche, hochleitfähige Phase und Wolfram ein hartes Gerüst bildet; die beiden Elemente sind unlöslich. Ihre Zusammensetzung besteht typischerweise aus 50–80 % Wolfram und 20–50 % Silber. Das Herstellungsverfahren ähnelt stark dem von Wolfram-Kupfer-Legierungen und basiert primär auf Hochtemperaturschmelzen und -infiltration. Alternativ kann auch Pulvermischen mit anschließender Hochdruckverfestigung eingesetzt werden. Da Silber einen niedrigeren Schmelzpunkt (961 °C) als Kupfer aufweist, sind die Schmelz- und Infiltrationstemperaturen entsprechend niedriger, was zu einem größeren Prozessfenster und geringeren Anforderungen an die Anlagen führt.

Wolfram-Silber-Bleche übertreffen Wolfram-Kupfer-Bleche sowohl in der elektrischen als auch in der thermischen Leitfähigkeit. Die elektrische Leitfähigkeit erreicht problemlos 60–80 % IACS, und die Wärmeleitfähigkeit liegt zwischen 250 und 380 W/(m · K), während gleichzeitig die hohe Härte und Abtragsbeständigkeit von Wolfram erhalten bleiben. Besonders hervorzuheben ist, dass das unter einem Lichtbogen entstehende Silberoxid einen hohen Dampfdruck aufweist, der thermische Schäden effektiv abführt und dem Material eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion und Schweißen verleiht. Hinsichtlich der Verarbeitungseigenschaften lassen sich Wolfram-Silber-Bleche mit einem Silbergehalt von 30 % oder mehr im nahezu vollständig kalten Zustand auf unter 0,05 mm Dicke walzen. Dabei entstehen nur minimale Kantenrisse, und die silberweiße Oberfläche zeichnet sich durch eine hervorragende Optik aus. Wolfram-Silber-Platten werden derzeit hauptsächlich für elektrische Nieder- und Mittelspannungskontakte, Präzisionsrelais-Kontakte, Schleifkontakte und als Substrate für die Beschichtung der Innenwände bestimmter Spezialwellenleiter eingesetzt. In Bereichen wie hochwertigen Leistungsschaltern für den zivilen Gebrauch, Kfz-Relais und Luftfahrtrelais haben Wolfram-Silber-Platten aufgrund ihrer langen Lebensdauer, ihres geringen Kontaktwiderstands und ihrer geringen Materialübertragungseigenschaften die traditionellen Silber-Cadmium- und Silber-Nickel-Werkstoffe zunehmend ersetzt.

#### 2.1.5 Andere Wolframlegierungsbleche mit Bindemittelphase

Neben den bereits erwähnten gängigen Systemen sind in den letzten Jahren einige Wolframlegierungsbleche mit neuartigen oder zusammengesetzten Bindemittelphasen auf den Markt

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gekommen. Diese befinden sich hauptsächlich im Übergangsstadium von der Laborphase zur industriellen Anwendung oder werden in kleinen Serien gefertigt, um spezifische funktionelle Anforderungen zu erfüllen.

**Wolfram-Nickel-Kobalt-System:** Durch die Zugabe von 1 bis 3 % Kobalt zu einer Nickel-Eisen- oder Nickel-Kupfer-Basis kann die Festigkeit der Bindemittelphase und die Beständigkeit gegen Erweichung bei hohen Temperaturen deutlich verbessert werden, wodurch sich das System für Kühlkörper oder Strukturbauteile eignet, die höhere Betriebstemperaturen erfordern.

**Wolfram-Nickel-Molybdän-System:** Durch den teilweisen Ersatz von Wolfram durch Molybdän (5 % bis 20 %) wird der Wärmeausdehnungskoeffizient reduziert, während gleichzeitig eine hohe Dichte erhalten bleibt. Dies verbessert die thermische Anpassung an Keramik oder Glas. Es wird häufig in Gehäusen für elektronische Bauteile oder in Vakuumdichtungs-Übergangsplatten eingesetzt.

**Wolfram-Seltenerd-System:** Die Zugabe von Spuren Mengen an Seltenerdoxid wie  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  und  $\text{CeO}_2$  verbessert die Rekristallisationstemperatur und die Hochtemperaturfestigkeit durch einen Dispersionshärtungsmechanismus, während gleichzeitig die Wolframkörner verfeinert und die Rissbeständigkeit beim Dünnblechwalzen verbessert werden.

TiC, ZrC und andere Carbidpartikel werden der Nickelbasis-Bindemittelphase zugesetzt, um eine dritte Phasenverstärkung zu bilden, die Härte und Verschleißfestigkeit deutlich verbessert. Das Material wird hauptsächlich für verschleißfeste Auskleidungen oder Präzisionsformeinsätze verwendet.

**Wolfram-Hochentropie-Bindemittelsystem:** Ein neuer Forschungsansatz, bei dem Hochentropie-Legierungspulver wie FeCoNiCrMn und FeCoNiCrAl als Bindemittelphasen eingesetzt werden, um höhere Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit bei gleichzeitig hoher Dichte zu erzielen. Derzeit befindet sich das Verfahren noch im Laborstadium (Folienverfahren).

## 2.2 Wolframlegierungsbleche von Core Performance

Die Klassifizierung von Wolframlegierungsblechen nach ihren Kerneigenschaften spiegelt die Anforderungen an die jeweilige Hauptfunktion des Materials in technischen Anwendungen wider. Wolframlegierungsbleche lassen sich derzeit anhand ihrer Kerneigenschaften grob in drei Kategorien einteilen: hohe Dichte, hohe Härte und Korrosions-/Verschleißbeständigkeit. Obwohl es Überschneidungen zwischen diesen drei Kategorien gibt, unterscheiden sich ihre Hauptfunktionen.

### 2.2.1 Wolframlegierungsblech mit hoher Dichte

Hochdichte Wolframlegierungsbleche sind die am häufigsten hergestellten und verwendeten Wolframlegierungsbleche. Ihr Hauptziel bei der Konstruktion ist die Maximierung der theoretischen Dichte bei gleichzeitiger Gewährleistung ausreichender Bearbeitbarkeit und mechanischer

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zuverlässigkeit. Typische Dichten liegen zwischen 17,0 und 18,8 g/cm<sup>3</sup>, wobei einige Bleche fast 19,0 g/cm<sup>3</sup> erreichen und damit die meisten technischen Metalle deutlich übertreffen.

Diese Bleche bestehen fast vollständig aus Nickel-Eisen- oder Nickel-Kupfer-Legierungen mit einem Wolframgehalt von 93–97 % und einem Bindemittelanteil von 3–7 %. Um die theoretische Dichte weiter zu optimieren, werden in der Produktion üblicherweise hochreines, feines Wolframpulver, verlängerte Flüssigphasen-Sinterzeiten und ein Nachpressen nach dem Heißisostatpressen eingesetzt, um die Porosität auf unter 0,1 % zu reduzieren. Der Walzprozess umfasst im Wesentlichen großreines Warmwalzen, gefolgt von mehrstufigem Kaltwalzen, verbunden mit einer sorgfältigen Zwischenglühung im Vakuum, um sicherzustellen, dass die Dichtehomogenität in Dickenrichtung 0,5 % nicht überschreitet.

Hochdichte Wolframlegierungsbleche bieten erhebliche Vorteile in Anwendungen, die eine hohe Massenkonzentration und ein geringes Volumen erfordern. In der Medizin werden für Multilamellenkollimatoren in Strahlentherapiegeräten häufig 0,15–0,5 mm dicke Bleche aus 93W-4,9Ni-2,1Fe verwendet. Ihre hohe Dichte führt zu einer verbesserten Strahlenschutzwirkung und Volumeneinsparungen, was die Behandlungsgenauigkeit und die Bestrahlungsbettbelegung direkt erhöht. Auch im Bereich der Präzisionsinstrumente findet dieses Material breite Anwendung, beispielsweise für Gegengewichte und Ausgleichsplatten in Analysenwaagen, Gyroskopen und Trägheitsnavigationssystemen. Die Dicke liegt typischerweise zwischen 0,05 und 2 mm, die Dichtetoleranz innerhalb von  $\pm 0,05$  g/cm<sup>3</sup>.

In den letzten Jahren hat die steigende Nachfrage nach lokalen Gegengewichten in Elektrofahrzeugen und Wearables dazu geführt, dass hochdichte Wolframlegierungsbleche in Richtung ultradünner (<0,1 mm) und hochglänzender ( $R_a \leq 0,1 \mu\text{m}$ ) Materialien weiterentwickelt wurden. Einige High-End-Produkte erreichen durch Verbundlaminierung mit Polymeren oder Aluminiumlegierungen ein noch breiteres Anwendungsspektrum in der Unterhaltungselektronik.

### 2.2.2 Hochhartes Wolframlegierungsblech

Hochharte Wolframlegierungsbleche zeichnen sich durch eine signifikante Verbesserung der Oberflächen- und Gesamthärte aus und erfordern typischerweise eine Vickershärte zwischen 380 und 550 HV30, wobei einige verstärkte Sorten Werte von über 600 HV30 erreichen. Die Härteverbesserung dieser Bleche wird durch drei Methoden erzielt: Optimierung der Zusammensetzung, Verformungsverfestigung und Dispersion der zweiten Phase.

Gängige technische Ansätze umfassen: die Erhöhung des Wolframgehalts auf 95–98 %, um den Anteil der weichen Binderphase zu reduzieren; die Verwendung einer Binderphase mit hohem Kobalt-Nickel-Eisen-Gehalt (Co-Gehalt 3–8 %), um die Mischkristall- und Ausscheidungshärtungseffekte von Kobalt zu nutzen; das Kaltwalzen mit einer Gesamtverarbeitungsrate von über 70 %, um eine starke Faserstruktur und eine hohe Versetzungsdichte zu erzeugen; die Zugabe von Karbidpartikeln wie TiC, ZrC und WC (Volumenanteil 2–8 %) zur Dispersionshärtung; und die Langzeitlagerung bei niedrigen Temperaturen, um feine intermetallische Verbindungen aus der Binderphase auszufällen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Hochharte Wolframlegierungsbleche verbessern die Kratz-, Eindruck- und Dauerfestigkeit deutlich und behalten gleichzeitig eine gewisse Duktilität bei. Im Bereich der Präzisionsformen, beispielsweise als Edelstahl-Formeinsätze für die Stanzung von Handygehäusen, können Wolframlegierungsbleche mit einer Härte von 450 HV oder höher die Standzeit der Form im Vergleich zu herkömmlichem Schnellarbeitsstahl um das Drei- bis Fünffache verlängern. In Heißpressformen für optisches Glas bieten Wolframlegierungsbleche mit einer Oberflächenhärte von 520 HV, kombiniert mit ionenimplantierten, nitrierten Wolframlegierungsblechen, wirksamen Schutz vor Hochtemperatur-Glasadhäsion und abrasivem Verschleiß.

Darüber hinaus werden in der High-End-Uhrenherstellung hochharte Wolframlegierungsbleche zu Rotoren oder Mikrozahnrädern verarbeitet. Dabei wird ihre hohe Dichte zur Erhöhung der Massenträgheit genutzt, während ihre hohe Härte die Verschleißfestigkeit im Langzeitbetrieb gewährleistet. In den letzten Jahren haben einige Hersteller ein kombiniertes Verfahren aus Vakuumwärmebehandlung und Tieftemperaturbehandlung eingesetzt, um einen Gradienten der Oberflächenhärte auf Wolframlegierungsblechen zu erzeugen und so die Oberflächenverschleißfestigkeit mit der Kernzähigkeit weiter in Einklang zu bringen.

### 2.2.3 Korrosionsbeständige und verschleißfeste Wolframlegierungsbleche

Korrosions- und verschleißfeste Wolframlegierungsbleche werden hauptsächlich für Einsatzbereiche wie die chemische Industrie, die Schifffahrt und die Lebensmittelverarbeitung entwickelt, wo sie mit korrosiven Medien oder abrasiven Umgebungen in Kontakt kommen. Ihr Hauptzweck ist die Verlängerung der Lebensdauer von Werkstoffen unter sauren, alkalischen, salzhaltigen und abrasiven Bedingungen.

Der Hauptimplementierungsweg umfasst: die Auswahl eines hoch-nickelhaltigen Kupfer- oder Nickel-Chrom-Binderphasensystems, die Erhöhung des Nickelgehalts auf 8–12 % und des Chromgehalts auf 2–5 %, um eine Selbstpassivierungsfähigkeit zu erzielen; die chemische Abscheidung von Nickel-Phosphor oder Nickel-Bor auf der Oberfläche oder die Vakuumplattierung von Hartstoffschichten wie CrN, TiAlN und DLC mit einer Dicke von 10–50 µm; die Zugabe von Spuren Mengen an Seltenerdelementen oder Bor und Phosphor, um die Bildung eines dichteren schützenden Oxidfilms in der Binderphase zu fördern; und die Anwendung eines Hochenergie-Kugelmühlen- + Funkenplasmasinterprozesses zur Gewinnung nanokristalliner oder amorph-nanokristalliner Verbundstrukturen.

In Anwendungen wie Laufradschutz für Chemiepumpen, Einsätzen für lebensmitteltaugliche Rührwerke und Ventilplatten für Meerwasserentsalzungsanlagen weisen Wolframlegierungsbleche mit einer hoch-nickelhaltigen Oberflächenbeschichtung und einem entsprechenden Substrat eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen Lochfraß und Spaltkorrosion auf. In stark abrasiven Umgebungen, wie beispielsweise bei der Auskleidung von Schlammlleitungen und Sieben in Mineralaufbereitungsanlagen, beträgt der Gewichtsverlust von TiC -dispersionsgehärteten Wolframlegierungsblechen nur 1/5 bis 1/8 desjenigen von hochchromhaltigem Gusseisen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Erwähnenswert ist, dass einige korrosions- und verschleißfeste Wolframlegierungsbleche auch eine Gradientenstruktur aufweisen: Die Oberflächenschicht ist mit hochchrom-nickelhaltigen Binderphasen und Hartphasen angereichert, während der Kern das traditionelle Nickel-Eisen-Verhältnis beibehält. Dies gewährleistet Korrosions- und Verschleißbeständigkeit, ohne die Gesamtzähigkeit und Bearbeitbarkeit zu beeinträchtigen. Diese Struktur stellt die neueste Strategie für Wolframlegierungsbleche in anspruchsvollen Einsatzumgebungen dar.

## 2.3 Klassifizierung von Wolframlegierungsblechen nach Größe und Spezifikationen

Die Klassifizierung von Wolframlegierungsblechen nach Größe ist die direkteste Kommunikationsform zwischen Herstellern und Anwendern. Die Dicke ist der wichtigste Parameter, der die Bearbeitungsschwierigkeiten, die Kosten und die Anwendungsrichtung bestimmt. Breite und Länge spielen zwar auch eine Rolle, lassen sich aber in der Regel durch Scheren, Laserschneiden oder Wasserstrahlschneiden flexibel anpassen, sobald die Dicke festgelegt ist. Aktuell hat sich in der Branche eine relativ einheitliche Klassifizierung der Dickenbereiche etabliert, die sowohl die Grenzen der Bearbeitungsmöglichkeiten als auch verschiedene typische Anwendungsszenarien widerspiegelt.

### 2.3.1 Ultradünnes Wolframlegierungsblech (Dicke < 0,1 mm)

Ultradünne Wolframlegierungsbleche sind typischerweise Folien mit einer Enddicke zwischen 0,005 mm und 0,099 mm, wobei die dünnsten unter 0,008 mm liegen. Die Herstellung dieser Bleche stellt die höchste Stufe der Wolframlegierungswalztechnologie dar und erfordert extrem hohe Standards hinsichtlich Rohmaterialreinheit, Rohlinggleichmäßigkeit, Walzgenauigkeit und Reinraumumgebung.

Die Herstellung ultradünner Folien erfolgt typischerweise mit Nickel-Eisen- oder Nickel-Kupfer-Systemen mit einem Wolframgehalt von 90–95 % und einem etwas höheren Anteil an Bindemittelphase, um die Kaltverformbarkeit zu gewährleisten. Der Rohling wird zunächst durch Heißisostatisches Pressen oder Vakuumwarmwalzen zu einer 2–5 mm dicken Platte vorgeformt und anschließend mehrfach kaltgewalzt. Die Reduktion in jedem Walzstich wird streng auf 5–15 % kontrolliert, und die Gesamtausbeute liegt oft über 95 %. Um Spröðbrüche durch Oxidationseinschlüsse zu vermeiden, ist eine Zwischenglühung unter Hochvakuum oder hochreinem Wasserstoff erforderlich. Die Oberflächenrauheit der fertigen Folie kann Ra unter 0,05 µm erreichen, und die Dickentoleranz liegt innerhalb von ±0,003 mm.

Ultradünne Wolframlegierungsbleche werden hauptsächlich für die dünnsten Lamellen von Multilamellenkollimatoren in medizinischen Strahlentherapiegeräten, flexible Strahlenschutzvorhänge, Schwingungsdämpfungsfolien für Präzisionsinstrumente, automatische Rotoren in hochwertigen Uhren und einige flexible elektronische Substrate verwendet. In den letzten Jahren wurden aufgrund der Nachfrage nach ultradünnen, hochdichten Materialien für tragbare medizinische Geräte und faltbare Smartphones Nickel-Kupfer-basierte ultradünne Folien mit einer Dicke von 0,03–0,07 mm zunehmend mit Polymeren kombiniert, um neue Funktionsfolien zu entwickeln, die Abschirmung und Flexibilität vereinen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 2.3.2 Wolframlegierungsbleche mit üblicher Dicke (0,1–10 mm)

Der Dickenbereich von 0,1 mm bis 10 mm ist derzeit der größte und am weitesten verbreitete Bereich und macht über 90 % der Gesamtproduktion von Wolframlegierungsblechen aus. Die Verarbeitungstechnologie für diesen Dickenbereich ist ausgereift, die Kosten sind relativ gut kontrollierbar, und die Maßgenauigkeit sowie die gleichbleibende Leistung erfüllen die Anforderungen der meisten Branchen.

Dieser Dickenbereich deckt die gesamte Prozesskette vom Warmwalzen bis zum Kaltwalzen ab. Nach mehreren Warmwalzstichen bei 1100–1300 °C wird die Dicke des Rohlings auf 3–8 mm reduziert. Anschließend erfolgt das Kaltwalzen und mehrere Zwischenglühprozesse, um die gewünschten Spezifikationen zu erreichen. Die Dickentoleranz liegt üblicherweise zwischen  $\pm 0,01$  und  $\pm 0,05$  mm. Die Oberfläche kann je nach Bedarf poliert, geschliffen oder chemisch geätzt werden.

Wolframlegierungsbleche in Standarddicken decken nahezu alle gängigen Anwendungen ab: 0,1–0,5 mm für Kollimatorlamellen und Abschirmplatten; 0,5–2 mm für Gegengewichte, Schwingungsdämpfer und Kühlkörper; 2–6 mm für Formeinsätze und Target-Rückplatten; und 6–10 mm werden hauptsächlich als strukturelle Träger oder vorgefertigte Rohlinge verwendet. Diese Vielfalt an Dicken spiegelt sich auch in den Oberflächenbehandlungen wider, die Nickel-, Gold-, Silber-, DLC-Beschichtungen oder Direktanodisierung ermöglichen, um farbige Dekorschichten zu erzeugen und so unterschiedlichen Anforderungen von industriellen Funktionen bis hin zur Ästhetik von Konsumgütern gerecht zu werden.

### 2.3.3 Dickwandiges Wolframlegierungsblech (Dicke > 10 mm)

Wolframlegierungsbleche mit einer Dicke von über 10 mm werden im Allgemeinen als dicke Platten oder dickwandige Bleche bezeichnet, wobei die maximale Dicke über 50 mm beträgt. Obwohl diese Produkte nur einen geringen Anteil der gesamten Wolframlegierungsblechproduktion ausmachen, machen ihr hoher Wert pro Blech und die schwierige Verarbeitung sie zu einer wichtigen Produktionskapazität, die viele Hersteller beibehalten.

Dickwandige Bleche werden primär durch Warmwalzen, ergänzt durch Kaltwalzen, hergestellt. Sinterblöcke haben typischerweise Durchmesser von 300–500 mm. Die Warmwalztemperaturen werden auf 1350–1450 °C geregelt, mit einer Reduktion von 20–30 % pro Walzstich, bis die Dicke 12–15 mm erreicht. Anschließend werden die Bleche zum Warm- oder Kaltwalzen für die Endbearbeitung weitergeleitet. Um Kantenrisse zu vermeiden, werden üblicherweise Walzen mit Plattierung oder seitlicher Fixierung eingesetzt. Die Toleranz der Endproduktdicke beträgt in der Regel  $\pm 0,1$ – $\pm 0,3$  mm. Die Oberfläche muss gefräst oder geschliffen werden, um die entkohlte Schicht und die Oxidschicht zu entfernen.

Dickwandige Wolframlegierungsbleche werden hauptsächlich für Kollimatorbasen großer medizinischer Linearbeschleuniger, Abschirmkörper für industrielle CT-Detektoren, Ausgleichsscheiben großer Trägheitsinstrumente, Gegengewichte für Ölbohrungen und Wärmeabsorber in Hochenergiephysik-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Experimenten eingesetzt. Aufgrund ihrer Größe und ihres hohen Gewichts erfordern Transport und Bearbeitung oft Spezialwerkzeuge. Daher greifen Anwender in der Weiterverarbeitung häufig auf endkonturnahe Konstruktionen zurück, um den späteren Zuschnitt zu minimieren.

#### 2.3.4 Wolframlegierungsbleche in Sondergrößen

Sonderanfertigungen von Wolframlegierungsblechen umfassen diverse unregelmäßige Formen, besonders breite, besonders lange oder zusammengesetzte Strukturbleche, die Standardrechtecke und -dicken überschreiten. Diese Produkte werden vollständig nach Kundenzeichnungen gefertigt und spiegeln den Trend in der Wolframlegierungsblechproduktion wider, der sich von der „Standardlieferung“ hin zur „Lösungsbereitstellung“ verlagert.

Zu den gängigen Sondertypen gehören: vorgeformte Bleche mit Tiefziehstufen, perforierte Bleche mit Durchgangslöchern oder Senkbohrungen, ultrabreite Bleche mit einer Breite von über 600 mm, ultralange Streifen mit einer Länge von über 2 m, Funktionsbleche mit Mikrostrukturierungen auf der Oberfläche und laminierte Bleche, die direkt mit Kupfer, Aluminium, Molybdän, Keramik usw. verbunden sind. Die Herstellung erfordert oft spezielle Verfahren wie Spezialformen, Laserschneiden, CNC-Fräsen, Vakuumlöten oder Heißisostatisches Pressen (HIP).

Beispielsweise benötigen einige hochwertige Medizingeräte Wolframlegierungsbleche mit 500 mm breiten und 0,2 mm dicken Schwalbenschwanznuten und einer Kantengenauigkeit von 0,05 mm; einige optische Instrumente für die Luft- und Raumfahrt benötigen schwingungsdämpfende Wolframlegierungsbleche mit hochglanzpolierten Oberflächen und komplexen Krümmungen. Obwohl diese Spezialprodukte hohe Stückpreise aufweisen, sind die Gesamtkosten tatsächlich niedriger, da sie die Nachbearbeitungsschritte für die Kunden direkt reduzieren.

#### 2.4 Wolframlegierungsbleche nach Anwendungsszenarien

Die Klassifizierung von Wolframlegierungsblechen nach ihren Anwendungsbereichen ermöglicht ein klareres Bild des tatsächlichen Wertes des Materials in verschiedenen Branchen. Aktuell hat sich ein relativ stabiles Muster bei den Hauptanwendungsgebieten von Wolframlegierungsblechen herausgebildet, das Medizintechnik, industrielle Fertigung, Elektronik und weitere Spezialgebiete umfasst.

##### 2.4.1 Wolframlegierungsbleche für die Landesverteidigung und militärische Zwecke

Wolframlegierungsbleche werden aufgrund ihrer hohen Dichte, Festigkeit und Zähigkeit vorwiegend in der Verteidigungs- und Militärindustrie eingesetzt. Diese Anwendungen umfassen Bauteile, die eine hohe Massenkonzentration, strukturelle Stabilität oder spezifische Funktionalitäten erfordern. Der hohe Wolframgehalt der Bleche bietet Vorteile hinsichtlich der Massenträgheit, während die Bindemittelphase die Bearbeitbarkeit optimiert und präzises Umformen sowie Oberflächenbehandlungen ermöglicht.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beim Ausbalancieren von Gegengewichten sorgen Wolframlegierungsbleche für eine gleichmäßige Massenverteilung und damit für einen stabilen Systembetrieb. Ihre einheitliche Dicke gewährleistet dabei Präzision. In schützenden Konstruktionen nutzen Wolframlegierungsbleche ihre Strahlungsdämpfungseigenschaften für eine hocheffiziente, dünne Abschirmung, während Verbundkonstruktionen die Gesamtfestigkeit erhöhen. Die thermische Stabilität von Wolframlegierungsblechen ermöglicht den Einsatz in Hochtemperaturumgebungen, und die Oberflächenbeschichtung verbessert die Korrosionsbeständigkeit.

Anwendungen legen Wert auf Zuverlässigkeit, weshalb Wolfram-Nickel-Eisen-Systeme weit verbreitet sind und chemische Stabilität für den Langzeiteinsatz gewährleisten. Die Verwendung von Wolframlegierungsblechen in der Verteidigungs- und Rüstungsindustrie hat die Miniaturisierung von Bauteilen ermöglicht, und die hohe Dichte reduziert den Platzbedarf.

#### **2.4.2 Wolframlegierungsbleche für die industrielle Fertigung**

In der industriellen Fertigung nutzen Wolframlegierungsbleche ihre Vorteile aus hoher Dichte und ausgezeichneter Verschleißfestigkeit und finden daher breite Anwendung in verschiedenen Auswucht- und Schwingungsdämpfungskomponenten, verschleißfesten Auskleidungen und Formteilen. In Präzisionsinstrumenten werden häufig Nickel-Eisen-basierte Bleche für Gegengewichte, Analysenwaagen und Komponenten der Trägheitsnavigation eingesetzt, um die Stabilität der Geräte durch präzise Massenverteilung zu verbessern. Schwingungsdämpfungsplatten in schnell rotierenden Maschinen nutzen den hohen Elastizitätsmodul und die moderaten Dämpfungseigenschaften von Wolframlegierungsblechen zur effektiven Resonanzunterdrückung.

In der Formenindustrie werden Wolframlegierungsbleche zu Stanzwerkzeugeinsätzen, Heißpresskernen für Glasformen oder Drahtziehdüsen-Einlaufbuchsen verarbeitet. Ihre hohe Härte und Beständigkeit gegen Erweichung bei hohen Temperaturen verlängern die Lebensdauer der Formen erheblich. Verschleißfeste Auskleidungen, Ventilplatten und Düsen in Öl- und Bergbaumaschinen bestehen ebenfalls häufig aus karbidverstärkten Wolframlegierungsblechen, um der doppelten Belastung durch abrasive Erosion und korrosive Medien standzuhalten.

#### **2.4.3 Wolframlegierungsbleche für nukleare und medizinische Anwendungen**

In der Medizin- und Nuklearindustrie werden Wolframlegierungsbleche hauptsächlich für Strahlenschutz und Kollimationskomponenten eingesetzt. Lamellenkollimatoren in Strahlentherapiegeräten verwenden üblicherweise Bleche auf Nickel-Eisen- oder Nickel-Kupfer-Basis mit einer Dicke von 0,1–2 mm, wodurch durch Schichtung eine flexible Formung des Strahls erreicht wird. Im Vergleich zu herkömmlichem Blei sind Wolframlegierungsbleche ungiftig, hochfest und behalten scharfe Kanten problemlos bei, was sie zur gängigen Wahl macht. Detektorkollimatoren in nuklearmedizinischen Bildgebungsgeräten und PET/CT-Streugitter verwenden ebenfalls häufig Wolframlegierungsbleche, um die Bildauflösung zu verbessern. In der industriellen zerstörungsfreien Prüfung, wie z. B. der Röntgenprüfung großer Gussteile und der Gammastrahlenprüfung von

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

Rohrschweißnähten, werden ebenfalls Abschirmboxen oder Kollimationsfenster aus Wolframlegierungsblechen benötigt. In der Nuklearindustrie werden gelegentlich dickere Wolframlegierungsplatten zur Auskleidung von Strahlenschutzbehältern und zur lokalen Verstärkung von Abfalllagertanks verwendet, um eine effiziente Abschirmung auf engstem Raum zu erzielen. Mit der zunehmenden Verbreitung von Protonen- und Schwerionentherapiegeräten wächst auch die Nachfrage nach ultradünnen, hochgradig gleichmäßigen Wolframlegierungsblechen stetig.

#### 2.4.4 Wolframlegierungsbleche für Anwendungen in der elektronischen Informationstechnik

Die Nachfrage nach Wolframlegierungsblechen in der Elektronik- und Informationsindustrie konzentriert sich hauptsächlich auf drei Bereiche: Wärmemanagement, elektromagnetische Abschirmung und Sputtertargetmaterialien. Hochleistungschips, Leistungsverstärker für 5G-Basisstationen, Laser und andere Geräte verwenden häufig Wolfram-Kupfer- oder Nickel-Kupfer-basierte Wolframlegierungsbleche als Kühlkörper oder Erweiterungsschichten. Dabei wird deren ähnlicher Wärmeausdehnungskoeffizient wie der von Halbleitermaterialien und ihre hohe Wärmeleitfähigkeit genutzt, um die Sperrschichttemperatur effektiv zu senken. Wolframlegierungsbleche werden auch häufig als Rückplatten für Vakuum-Sputtertargets eingesetzt. Sie werden durch Hartlöten oder Explosionsschweißen mit reinen Wolfram- oder Wolfram-Rhenium-Targets verbunden, wodurch eine hohe Verbindungsfestigkeit bei gleichzeitiger Kostenkontrolle gewährleistet wird.

Im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) werden nichtmagnetische Wolframlegierungsbleche zur Herstellung von Abschirmabdeckungen, Absorptionsflächen oder Erdungsfedern für magnetfeldempfindliche Geräte wie Mobiltelefone, Medizinelektronik und Avionik eingesetzt. Einige High-End-Audiogeräte verwenden hochdichte Wolframlegierungsbleche zur Herstellung von Lautsprechermembran-Gewichtsringen, um die Tieftonwiedergabe zu verbessern. In den letzten Jahren ist mit der rasanten Entwicklung von Halbleiterbauelementen der dritten Generation (Galliumnitrid, Siliziumkarbid) die Nachfrage nach dünneren, wärmeleitfähigeren Wolframkupferblechen stark gestiegen, was eine kontinuierliche Optimierung der entsprechenden Prozesse vorangetrieben hat.

#### 2.4.5 Andere spezielle Wolframlegierungsbleche

Neben den oben genannten Hauptanwendungen spielen Wolframlegierungsbleche in einigen speziellen Bereichen eine wichtige Rolle. In der Luxusuhrenindustrie werden polierte Wolframlegierungsbleche zur Herstellung von Automatikrotoren verwendet, was die Aufzugseffizienz erhöht und für ein angenehmes Tragegefühl sorgt. Im Sportartikelbereich werden einige Golfschlägerköpfe mit Wolframlegierungsblechen versehen, um den Schwerpunkt anzupassen und die Schlagstabilität zu verbessern. Im Schmuck- und Kunsthandwerksbereich werden vergoldete oder schwarz plattierte Wolframlegierungsbleche für Uhrengehäuse, Ringinnenseiten oder dekorative Verschlüsse verwendet und erfreuen sich aufgrund ihrer kratzfesten Oberfläche und ihres einzigartigen metallischen Glanzes zunehmender Beliebtheit.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



In der wissenschaftlichen Forschung werden Wolframlegierungsbleche häufig zu hochdichten Targetplatten, Probenhaltern oder lokalen Auskleidungen für Vakuumkammern verarbeitet, die in Synchrotronstrahlungsquellen und Teilchenbeschleunigerexperimenten zum Einsatz kommen. Auch in der Kunstrestaurierung und der Konservierung von Kulturgütern werden Wolframlegierungsbleche gelegentlich für Präzisionsgewichte oder zur strukturellen Verstärkung verwendet. Darüber hinaus greifen einige aufstrebende interdisziplinäre Bereiche, wie beispielsweise Vibrationsmotorgewichte für tragbare Geräte, Auswuchtplatten für Drohnen und Radgewichte für Rennwagen, zunehmend auf Wolframlegierungsbleche zurück, um eine Kombination aus Miniaturisierung und hoher Leistungsfähigkeit zu erzielen.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsbleche

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

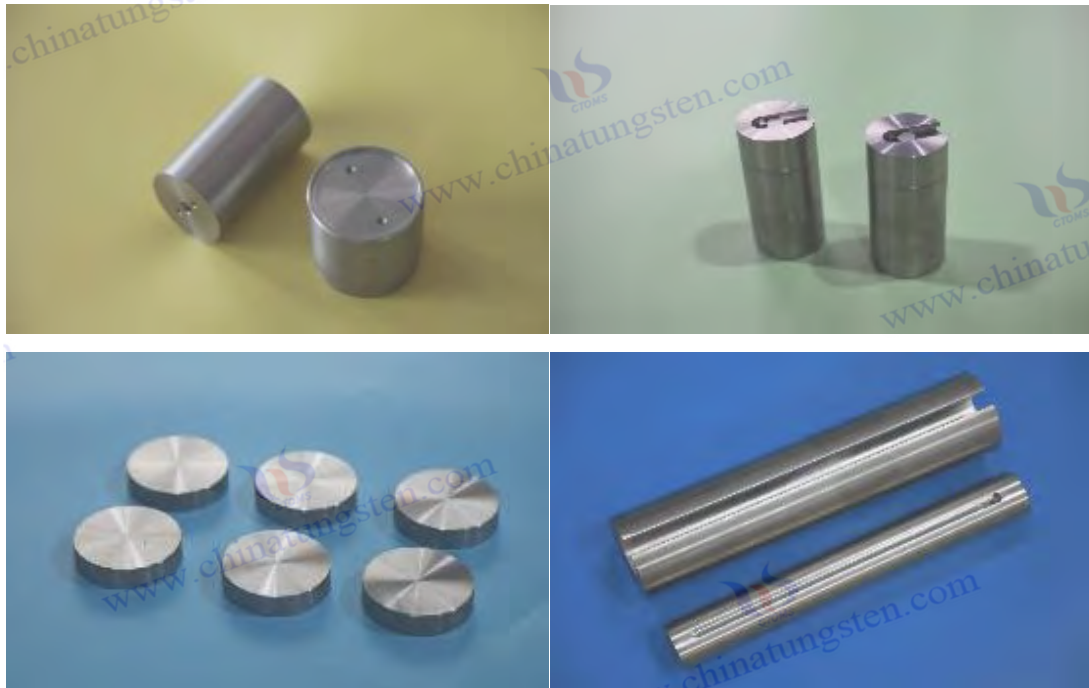
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

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



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Kapitel Drei: Legierungsprinzipien und Zusammensetzungssysteme von Wolframlegierungsblechen

### 3.1 Chemische Grundlagen der Wolframlegierungsbleche

Wolframlegierungsbleche entstehen durch die Zugabe geringer Mengen anderer Metalle oder Verbindungen zu Wolfram. Dadurch werden die Plastizität bei Raumtemperatur, die Festigkeit bei hohen Temperaturen, die Oxidationsbeständigkeit und die Verarbeitbarkeit deutlich verbessert, während die hohe Dichte und der hohe Schmelzpunkt von Wolfram erhalten bleiben. Wolfram selbst besitzt eine kubisch-raumzentrierte Struktur und einen großen Atomradius. Reines Wolfram weist bei Raumtemperatur nahezu keine beweglichen Gleitsysteme auf, und seine Sprödbruchtemperatur liegt bei 300–400 °C oder höher, wodurch es beim Walzen bei Raumtemperatur extrem rissanfällig ist. Durch die Legierung bildet die eingebrachte kubisch-flächenzentrierte oder hexagonal dichteste Kugelpackung der Binderphase kontinuierliche Kanäle für die plastische Verformung der Wolframpartikel. Gleichzeitig finden während des Sinterns und Warmumformens verschiedene physikalisch-chemische Prozesse statt, darunter Lösungs- und Wiederausfällungsprozesse, Benetzung der Grenzfläche und Spannungsregulierung zwischen den Phasen. Dies führt letztendlich zur Bildung einer typischen zweiphasigen Verbundstruktur, in der die Wolframpartikel von der Binderphase umschlossen sind. Diese Struktur bewahrt das harte Gerüst von Wolfram und erreicht gleichzeitig eine makroskopische Plastizität und Zähigkeit, die weit über die von reinem Wolfram hinausgeht. Dadurch werden die Voraussetzungen für ein nachfolgendes Walzen zu dünnen Blechen mit großer Verformung geschaffen.

#### 3.1.1 Phasendiagrammanalyse von Wolfram mit anderen metallischen Elementen

Wolfram ist im flüssigen Zustand mit den meisten Übergangsmetallen unendlich gut mischbar, seine Löslichkeit im festen Zustand ist jedoch extrem gering. Dies bildet die Grundlage des Phasendiagramms, das für die Legierung von Wolframblechen charakteristisch ist. Das binäre Phasendiagramm W-Ni zeigt, dass die feste Löslichkeit von Nickel in Wolfram bei 1500 °C 2 Atomprozent nicht übersteigt und bei Abkühlung auf Raumtemperatur nahezu null ist, während die Löslichkeit von Wolfram in Nickel etwas höher, aber dennoch begrenzt ist. W-Fe, W-Cu, W-Co, W-Mo und andere Systeme weisen ähnliche Eigenschaften auf: Bei hohen Temperaturen existiert ein breiter flüssiger Phasenbereich, der das Flüssigphasensintern begünstigt; bei niedrigen Temperaturen bilden sich nahezu vollständig unmischbare eutektische oder perieutektische Systeme. Es ist diese Eigenschaft der „Hochtemperaturmischbarkeit und Tieftemperaturtrennung“, die es Wolframlegierungen ermöglicht, während der Flüssigphasensinterphase durch den Ostwald-Reifungsmechanismus eine Sphäroidisierung und Verdichtung der Wolframpartikel zu erreichen und nach der Festphasenabkühlung eine Zweiphasenstruktur mit klar getrennten Wolframpartikeln und Binderphase zu bilden.

Die Systeme W-Cu und W-Ag sind extremer; selbst im flüssigen Zustand sind sie nur teilweise mischbar und bilden im festen Zustand überhaupt keine Verbindungen, wodurch sie typische Pseudolegierungen darstellen. W-Mo und W-Re hingegen ermöglichen es Molybdän und Rhenium, kontinuierliche Mischkristalle mit Wolfram zu bilden. Diese Eigenschaft kann genutzt werden, um den

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Wärmeausdehnungskoeffizienten anzupassen oder die Rekristallisationstemperatur durch teilweisen Ersatz von Wolfram durch Molybdän oder Rhenium zu erhöhen. Das ternäre Phasendiagramm W-Ni-Fe ist das in der Praxis am häufigsten verwendete. Nahe der Liquidustemperatur existiert ein breites Zweiphasengebiet aus flüssiger Phase und fester Wolframphase. Bei einem Nickel-Eisen-Verhältnis von 7:3 bis 8:2 ist der Anteil der flüssigen Phase moderat und ausreichend, um die Wolframpartikel zu benetzen, ohne dass der Rohling zusammenfällt. Die Phasendiagrammanalyse liefert eine direkte Grundlage für die Zusammensetzungsgestaltung: Der Gesamtanteil der Bindemittelphase wird üblicherweise auf 3 bis 10 Vol.-% begrenzt. Ein zu geringes Volumen führt zu ungenügender Benetzung und schlechter Dichte, während ein zu hohes Volumen die Dichte und Härte deutlich verringert.

### 3.1.2 Chemische Mechanismen der Mischkristallverfestigung und Dispersionsverfestigung

Wolframlegierungsbleche entstehen aus der Binderphase. Elemente wie Nickel, Eisen, Kupfer und Kobalt sind in der kubisch-flächenzentrierten  $\gamma$ -Phase unendlich gut mischbar und bilden Substitutionsmischkristalle. Das Einbringen der größeren Atomradien von Wolfram, Molybdän und Rhenium in die nickelbasierte Binderphase führt zu Gitterverzerrungen, die die Versetzungsbewegung behindern und somit die Streckgrenze der Binderphase erhöhen. Die Zugabe von Kobalt ist besonders wirksam, da sie die Stapelfehlerenergie reduziert, Quergleitung und Zwillingsbildung fördert und die Kaltverfestigung weiter verbessert. Eisen und Kupfer reduzieren ebenfalls die Stapelfehlerenergie der Binderphase, wodurch die Verformung besser koordiniert werden kann und die Gesamtplastizität indirekt verbessert wird.

Dispersionshärtung ist der Schlüsselmechanismus für die Erzielung hoher Festigkeit und Hochtemperaturleistung von Wolframlegierungsblechen. Beim Sintern nimmt die Löslichkeit von Wolfram in der Binderphase mit sinkender Temperatur stark ab, wodurch übersättigte Wolframatome während der Abkühlphase als extrem feine Partikel wieder ausfallen. Diese lagern sich an der Grenzfläche zwischen Wolfram und Binderphase ab und bilden eine Grenzflächenverfestigungsschicht. Gleichzeitig werden künstlich hinzugefügte Zweitphasenpartikel wie TiC, ZrC, HfC und Seltenerdoxide lösen sich beim Sintern nicht auf und verteilen sich gleichmäßig in der Binderphase oder an der Grenzfläche, wodurch die Versetzungs- und Korngrenzenwanderung wirksam behindert wird. In den letzten Jahren konnte die Wolframpartikelgröße bei nanokristallinen Wolframlegierungsblechen weiter auf unter 100 nm reduziert und die Festigkeit durch Nutzung des Hall-Petch-Mechanismus deutlich verbessert werden. Das Zusammenwirken dieser beiden Verstärkungsmechanismen ermöglicht es Wolframlegierungsblechen, auch bei Temperaturen über 900 °C hohe Festigkeitswerte beizubehalten.

### 3.1.3 Bildungsbedingungen und Stabilität von Legierungsphasen

Die wichtigsten Legierungsphasen in Wolframlegierungsblechen umfassen die Wolfram-Mischkristallphase, die  $\gamma$ - (Ni, Fe, Cu)-Bindemittelphase sowie mögliche intermetallische Verbindungen oder Oxiddispersionsphasen. Die Bildung der  $\gamma$ -Phase hängt von der ausreichenden Diffusion und Homogenisierung der Bindemittellelemente während des Flüssigphasensinterns ab. Die Sintertemperatur muss etwa 50–100 °C über dem niedrigsten eutektischen Punkt liegen und konstant

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



gehalten werden, damit sich die Wolframpartikel neu anordnen und sphäroidisieren können. Die Kontrolle von Spuren Mengen an Wasserdampf in einer Wasserstoffatmosphäre beeinflusst den Sauerstoffgehalt; ein zu hoher Gehalt führt zur Bildung von flüchtigem  $\text{WO}_2(\text{OH})_2$  und damit zu Wolframverlusten, während ein zu niedriger Gehalt zu unzureichender Entlüftung und geschlossenen Poren führt.

Die Langzeitstabilität der Binderphase wird hauptsächlich durch die Grenzflächenenergie und die Unterschiede in der Wärmeausdehnung zwischen Wolfram und Binderphase bestimmt. Der Benetzungswinkel an der Grenzfläche zwischen Wolfram und Nickel, Eisen und Kupfer liegt bei der Flüssigphasensinter Temperatur nahe  $0^\circ$ . Nach dem Abkühlen ist die Grenzflächenbindung überwiegend metallisch, was zu hoher Festigkeit führt. Die durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten verursachten Restspannungen an der Grenzfläche können beim Glühen teilweise abgebaut werden. Zu hohe Temperaturen können jedoch Kirkendall-Poren oder spröde Grenzflächenphasen (wie z. B.  $\text{Ni}_4\text{W}$ ) hervorrufen ( $\text{Fe}_7\text{W}_6$ ). Die Zugabe von Spuren Mengen an Seltenerdelementen oder Bor und Phosphor kann zur Anreicherung an der Grenzfläche führen und dünne amorphe oder zusammengesetzte Schichten bilden, wodurch die Hochtemperaturstabilität der Grenzfläche weiter verbessert wird. Unter Vakuum oder neutraler Atmosphäre können Wolframlegierungsbleche über längere Zeiträume oberhalb von  $1000^\circ\text{C}$  ohne signifikante Phasenumwandlung oder Mikrostrukturvergrößerung eingesetzt werden, während an Luft eine Oberflächenbeschichtung erforderlich ist, um die Bindemittelphase zu schützen und eine bevorzugte Oxidation zu verhindern.

### 3.2 Rolle und Anteil der Bestandteile in Wolframlegierungsblechen

Die Rolle und das Verhältnis der Bestandteile in Wolframlegierungsblechen sind zentrale Aspekte der Legierungsentwicklung. Durch die gezielte Auswahl und Kontrolle der Verhältnisse von Wolfram, Bindemitteln und Spurenzusätzen lassen sich die Verarbeitbarkeit, das mechanische Verhalten und die Umweltverträglichkeit des Materials optimieren, während gleichzeitig eine hohe Dichte und ein hoher Schmelzpunkt erhalten bleiben. Wolfram bildet als Hauptbestandteil die Grundlage für die Dichte und die Hochtemperaturstabilität des Materials, während Bindemittel wie Nickel, Eisen und Kupfer die Sprödigkeit verringern und die Verdichtung fördern. Die Zusammensetzungsentwicklung basiert typischerweise auf Phasendiagrammanalysen, Sinterkinetik und thermomechanischen Versuchsversuchen, um sicherzustellen, dass jedes Element seine Benetzungs- und Diffusionswirkung während der Flüssigphasensinterung voll entfaltet und im festen Zustand eine stabile Zweiphasenstruktur bildet. Ein zu hoher Wolframgehalt kann zu unzureichender Plastizität führen, während ein zu hoher Anteil an Bindemittelphase die Gesamtdichte verringert. Daher müssen die Anteile entsprechend dem Anwendungsfall angepasst werden. Beispielsweise kann in Anwendungen, die eine hohe Härte erfordern, der Wolframanteil entsprechend erhöht werden, während in Systemen, in denen die Wärmeleitfähigkeit wichtig ist, der Gehalt an Elementen wie Kupfer entsprechend erhöht wird. Die Zugabe von Spurenelementen verfeinert das Mikrogefüge weiter, hemmt das Kornwachstum oder verbessert die Grenzflächenfestigkeit. Ihre Anteile müssen jedoch streng kontrolliert werden, um die Einführung schädlicher Phasen zu vermeiden. Insgesamt spiegelt sich die Rolle der Bestandteile in einer

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Synergie auf verschiedenen Skalen wider: Festigkeitssteigerung durch Mischkristallbildung auf atomarer Ebene, Regulierung der Phasengrenzflächen im Mikrometerbereich und Ausgewogenheit der Eigenschaften auf Makroebene. Dieses Prinzip der Zusammensetzungsanpassung ist nicht nur auf traditionelle Nickel-Eisen- und Nickel-Kupfer-Systeme anwendbar, sondern kann auch auf neuartige Verbundwerkstoffe übertragen werden und ermöglicht es Werkstoffingenieuren, Legierungszusammensetzungen an spezifische Anforderungen anzupassen.

In der Praxis haben Reinheit und Partikelgrößenverteilung des Wolframpulvers einen signifikanten Einfluss auf die Endleistung. Hochreines, feines Pulver begünstigt eine gleichmäßige Verteilung und reduziert die Porosität. Die Bindemittelphasenelemente werden üblicherweise in Form von Metallpulver oder vorlegiertem Pulver zugesetzt, um eine homogene Mischung zu gewährleisten. Die Wahl der Sintertemperatur ist eng mit der Zusammensetzung verknüpft; ein höherer Anteil an Bindemittelphase kann die Sintertemperatur senken, den Energieverbrauch reduzieren und das Wachstum der Wolframpartikel hemmen. Die Optimierung der Zusammensetzung während der Wärmebehandlung umfasst die Gestaltung des Glühprozesses und die Steuerung der Elementverteilung in der festen Lösung durch Regulierung der Abkühlgeschwindigkeit, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Festigkeit und Zähigkeit zu erzielen. Auch bei der Oberflächenbehandlung muss die Zusammensetzung berücksichtigt werden; beispielsweise durch Anpassung der Konzentration der Oberflächenelemente vor der Beschichtung zur Verbesserung der Haftung. Die Zusammensetzung von Wolframlegierungsblechen wird zudem von der Ressourcenverfügbarkeit und Umweltfaktoren beeinflusst; Eisen oder Kupfer können teilweise aus Recyclingmaterialien gewonnen werden, jedoch müssen Verunreinigungen innerhalb akzeptabler Grenzen gehalten werden.

### 3.2.1 Synergistischer Mechanismus von Wolframlegierungsblechen im Nickel-Eisen-System

Der synergistische Mechanismus des Nickel-Eisen-Systems in Wolframlegierungsblechen beruht hauptsächlich auf dem komplementären Verhalten von Nickel und Eisen in der Binderphase und ihrer Grenzflächenwechselwirkung mit den Wolframpartikeln. Nickel, als Hauptbindemittel, sorgt in diesem System für gute Benetzbarkeit und Duktilität, während die Zugabe von Eisen die Mischkristallverfestigung erhöht und die Phasenstabilität reguliert. Gemeinsam fördern sie den reibungslosen Ablauf des Flüssigphasensinterprozesses. In den frühen Sinterstadien bilden Nickel und Eisen eine niedrigschmelzende flüssige Phase, die die Wolframpartikel rasch einkapselt und so deren Umlagerung und anfängliche Verdichtung bewirkt. Die Anwesenheit von Eisen reduziert die Viskosität der flüssigen Phase, erhöht die Diffusionsrate und erleichtert das Auflösen der Wolframatome in der Binderphase. Beim Abkühlen fallen feine Partikel aus, die die Grenzfläche weiter verstärken. Der Synergieeffekt zeigt sich auch in der Mikrostrukturentwicklung: Die Nickel-Eisen-Mischkristallphase weist eine kubisch-flächenzentrierte Struktur auf, die Verformungsspannungen effektiv absorbieren und den direkten Kontakt zwischen den Wolframpartikeln reduzieren kann, wodurch die Gesamtplastizität verbessert wird. Während der Warmumformung führt diese Synergie dazu, dass das Material beim Walzen weniger anfällig für Rissausbreitung ist, und die Mikrostruktur erlangt nach dem Glühen ihre Homogenität zurück.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aus chemischer Sicht führt der Unterschied in der elektronischen Struktur von Nickel und Eisen zu Gitterverzerrungen in der festen Lösung. Dies behindert die Versetzungsbewegung und erhöht die Festigkeit der Binderphase. Gleichzeitig beeinflusst der Ferromagnetismus des Eisens die elektromagnetischen Eigenschaften, ändert aber nicht die nichtmagnetische Dominanz des Systems. An der Grenzfläche neigt Nickel zur Bildung sauberer Bindungen, während Eisen die stabile Präsenz kleiner Oxide fördert, wodurch gemeinsam die Grenzflächenenergie erhöht wird. Beim Abkühlen hemmt der synergistische Effekt beider Elemente das anomale Wachstum von Wolframpartikeln und erhält eine feine, sphärische Morphologie, die für die anschließende Kaltverformung vorteilhaft ist. Mikroskopisch betrachtet handelt es sich um einen Lösungs-Wiederfällungs-Mechanismus: Bei hohen Temperaturen löst sich Wolfram teilweise in der Nickel-Eisen-Phase, und bei niedrigen Temperaturen fällt es wieder aus und fixiert Korngrenzen, was die Hochtemperaturstabilität erhöht. Makroskopisch äußert sich dies in der Dimensionsstabilität des Materials bei wiederholten Temperaturzyklen, wodurch es sich für Anwendungen eignet, die Beständigkeit gegen thermische Ermüdung erfordern. Eine proportionale Steuerung ist entscheidend für die Wirksamkeit des Mechanismus. Das Nickel-Eisen-Verhältnis wird üblicherweise so eingestellt, dass ein Gleichgewicht zwischen Benetzungs- und Festigkeitseffekten erreicht wird. Ein zu hoher Eisengehalt kann zur Bildung einer spröden Phase führen, während ein angemessener Gehalt die Zähigkeit optimiert.

Weiterführende Analysen zeigen, dass sich der Synergieeffekt auch auf das Korrosionsverhalten erstreckt: Nickel bildet die Grundlage für den Passivierungsfilm, während Eisen dessen gleichmäßige Verteilung unterstützt und so die Korrosionsbeständigkeit in sauren Medien verbessert. Hinsichtlich der Verarbeitungsleistung nutzt das Zwischenlagenglühen den Synergieeffekt beider Elemente, um das Mikrogefüge wiederherzustellen und die Ansammlung von Eigenspannungen zu reduzieren. Bezüglich der Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Umweltbedingungen ermöglicht dieses System eine Feinabstimmung, um mit verschiedenen Feuchtigkeits- und Temperaturverhältnissen umzugehen und so eine langfristige Betriebssicherheit zu gewährleisten. Zusammenfassend verkörpert der Synergiemechanismus des Nickel-Eisen-Systems die materialwissenschaftlichen Prinzipien der Elementkomplementarität und der Wechselwirkung auf verschiedenen Skalen und bietet damit eine zuverlässige Grundlage für die technischen Anwendungen von Wolframlegierungsblechen.

### 3.2.2 Synergistischer Mechanismus des Wolframlegierungsblech-Nickel-Kupfer-Systems

Der Synergieeffekt des Nickel-Kupfer-Systems in Wolframlegierungsblechen beruht auf der unendlichen Mischbarkeit von Nickel und Kupfer sowie dem einzigartigen chemischen Grenzflächenverhalten mit Wolfram. Nickel sorgt in diesem System für Bindungsfestigkeit und Benetzbarkeit, während die Zugabe von Kupfer die thermische und elektrische Leitfähigkeit deutlich verbessert. Gemeinsam bilden sie eine homogene Mischkristallphase, die die Verdichtung und Mikrostrukturoptimierung beim Sintern fördert. Während des Übergangs in die flüssige Phase weist die Nickel-Kupfer-Flüssigkeit eine niedrige Oberflächenspannung auf, wodurch sie sich leicht ausbreitet und die Wolframpartikel für eine effiziente Umlagerung bedeckt. Die Anwesenheit von Kupfer erhöht die Fließfähigkeit der flüssigen Phase, beschleunigt die Diffusion und Migration der Wolframatome und bildet während der Erstarrung eine feinere Grenzschicht, wodurch die Restporosität reduziert wird. Der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Synergieffekt spiegelt sich in den thermophysikalischen Eigenschaften wider: Die Nickel-Kupfer-Mischkristallphase vereint die Duktilität von Nickel mit den thermischen Diffusionseigenschaften von Kupfer und verleiht dem Material eine gute Stabilität unter Temperaturschocks. Bei der Verarbeitung trägt dieser Mechanismus dazu bei, dass sich das Material beim Warm- und Kaltwalzen gleichmäßig verformt und eine Trennung der Schichten vermieden wird.

Chemisch betrachtet bewirken die ähnlichen Atomgrößen von Nickel und Kupfer eine ungeordnete Verteilung in der festen Lösung, was zu geringen Gitterverzerrungen und erhöhter Phasenstabilität führt. Gleichzeitig verhindert die nichtmagnetische Natur des Kupfers eine Magnetisierung des Systems und macht es somit für elektromagnetisch empfindliche Umgebungen geeignet. Bei Grenzflächenwechselwirkungen neigt Nickel zur chemischen Bindung, während Kupfer die physikalische Adsorption fördert. Gemeinsam bilden sie eine energiearme Grenzfläche und verbessern die Haftfestigkeit. Bezüglich der Abkühlung wirken beide Elemente synergistisch zusammen, um eine ungleichmäßige Sphäroidisierung der Wolframpartikel zu verhindern, die Mikrostrukturkonsistenz zu erhalten und die Herstellung ultradünner Bleche zu erleichtern. Auf der Mikroebene beruht dieser Mechanismus auf einem thermodynamischen Gleichgewicht: Wolframatome lösen sich bei hohen Temperaturen und fallen bei niedrigen Temperaturen aus. So bilden sie dispergierte Verstärkungspartikel, die die Beständigkeit gegen Hochtemperaturkriechen erhöhen. Makroskopisch betrachtet weist das Material in Umgebungen mit Temperaturgradienten eine gleichmäßige Wärmeleitfähigkeit auf und eignet sich daher für Komponenten des Wärmemanagements. Nickel und Kupfer fördern synergistisch die schnelle Bildung eines Oberflächenpassivierungsfilms und verbessern so die Korrosions- und Witterungsbeständigkeit, wodurch der Schutz unter feuchten oder salzhaltigen Bedingungen optimiert wird. Beim Walzprozess werden die Diffusionsunterschiede zwischen den beiden Metallen genutzt, um Kristallfehler zu beheben und die Oberflächenqualität zu verbessern. Unter verschiedenen Umgebungsbedingungen ermöglicht dieses System die Feinabstimmung der Materialanteile, um sich an unterschiedliche Oxidationsatmosphären anzupassen und so kontrollierte, schrittweise Änderungen der Materialeigenschaften bei Langzeitbeanspruchung zu gewährleisten.

### 3.2.3 Dotierungseffekt von Spurenelementen auf Wolframlegierungsbleche

Wolframlegierungsbleche beeinflussen die Mikrostruktur und die Materialeigenschaften hauptsächlich durch Korngrenzensegregation, Phasengrenzflächenmodifikation und Störungen der Mischkristallbildung. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt in traditionellen Nickel-Eisen- oder Nickel-Kupfer-Systemen. Die Zugabe von Spurenelementen wie Bor, Phosphor und Kobalt kann die Wolframpartikel verfeinern, die Zähigkeit der Binderphase verbessern und die Gesamthomogenität erhöhen. Beim Sintern reichern sich die Dotierstoffe in der flüssigen Phase an, wodurch die Oberflächenenergie reduziert, eine gleichmäßige Verteilung der Wolframpartikel gefördert und deren Wachstum gehemmt wird. Nach der Dotierung ist die Mikrostruktur stabiler, die Porosität reduziert und die Dichte erhöht. Bei der Warmumformung trägt dieser Effekt dazu bei, die Rissbildung zu verringern, den Spannungsabbau beim Glühen zu beschleunigen und die Streckgrenze zu erhöhen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Mechanistisch betrachtet führt die Dotierung mit Seltenerdelementen wie Lanthan und Yttrium zur Bildung disperser Oxidphasen, die Korngrenzen fixieren, die Migration behindern und die Rekristallisationstemperatur erhöhen. Bor und Phosphor bilden dünne Filme an Grenzflächen, wodurch die Benetzungswinkel angepasst und die Phasenbindung verbessert werden. Die Dotierung mit Kobalt verstärkt die Bindemittel-Mischkristallphase, erhöht die Stapelfehlerenergie und verbessert die Verformungskompatibilität. Mikroskopisch bewirkt die Dotierung lokale Änderungen der Elektronendichte, die die Diffusionskinetik beeinflussen und bei niedrigen Temperaturen zur Ausscheidung feiner Phasen führen, was das Material zusätzlich verstärkt. Makroskopisch resultiert dies in einem ausgewogenen Verhältnis von mechanischen Eigenschaften mit koordinierter Bruchzähigkeit und Härte, wodurch sich das Material für Präzisionsbauteile eignet.

Hinsichtlich des Korrosionsverhaltens fördern Dotierungselemente das Wachstum von Passivierungsschichten und verbessern so die Beständigkeit gegenüber Erosion durch Medien. Bei der Oberflächenbehandlung verbessert die Dotierung die Haftung der Beschichtung und verlängert die Lebensdauer. Im Hinblick auf die Anpassung an unterschiedliche Umgebungsbedingungen ermöglicht dieser Effekt gezielte Anpassungen, um mit verschiedenen Temperatur- oder Feuchtigkeitsbedingungen umzugehen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Dotierungseffekt von Spurenelementen das Materialprinzip verkörpert, dass geringe Zusätze eine signifikante Wirkung haben, und somit einen effektiven Ansatz zur Optimierung der Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen bietet. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass dieser Effekt neue Dotierungsstrategien leiten und den kontinuierlichen Fortschritt in der Materialwissenschaft vorantreiben kann.

### 3.3 Chemische Grundlagen der Zusammensetzungsgestaltung von Wolframlegierungsblechen

Bei Wolframlegierungsblechen dreht sich alles um Phasengleichgewicht, Diffusionskinetik und das chemische Verhalten an den Grenzflächen. Diese Prinzipien bestimmen den gesamten Prozess von der Rohmaterialaufbereitung bis zur abschließenden Wärmebehandlung und gewährleisten die Stabilität und Reproduzierbarkeit der Materialeigenschaften. Kern der Zusammensetzungsentwicklung ist die Kontrolle des Verhältnisses von Wolfram zu Bindemittelphasenelementen. Mithilfe der Phasendiagrammanalyse lassen sich potenzielle Phasenstrukturen vorhersagen und die Bildung schädlicher Phasen vermeiden. Im Wolfram-Nickel-Eisen-System beispielsweise betonen chemische Prinzipien das ausgewogene Nickel-Eisen-Verhältnis, um die Benetzbarkeit beim Flüssigphasensintern und die Stabilität der festen Lösung nach dem Abkühlen zu gewährleisten. Diffusionsprinzipien erfordern die Berücksichtigung der Elementmigrationsraten bei hohen Temperaturen. Wolframatome diffundieren langsamer als Nickel oder Kupfer; daher ist eine längere Haltezeit notwendig, um eine gleichmäßige Verteilung zu fördern. Chemische Prinzipien an den Grenzflächen beziehen sich auf die Bindungsenergie zwischen Wolframpartikeln und der Bindemittelphase. Spurenelemente werden häufig hinzugefügt, um die Oberflächenspannung anzupassen und die Grenzflächenhaftung zu verbessern.

In der praktischen Konstruktion berücksichtigen chemische Prinzipien auch das Redoxgleichgewicht. Der Wasserstofftaupunkt der Sinteratmosphäre muss auf die Zusammensetzung abgestimmt sein, um die Wolframoxidation zu hemmen und die Reduktion der Bindemittelphase zu fördern. Bei der Formulierung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

erfordert ein höherer Wolframgehalt eine Erhöhung der Bindemittelphase, um den Plastizitätsverlust auszugleichen, während ein Überschuss an Bindemittel Anpassungen zur Aufrechterhaltung der Dichte notwendig macht. Die Wärmebehandlung folgt den Prinzipien der Phasenumwandlung, wobei die Abkühlgeschwindigkeit gesteuert wird, um die Größe und Verteilung der ausgefallten Phasen zu regulieren und die mechanischen Eigenschaften zu optimieren. Oberflächenchemische Prinzipien spiegeln sich in der Beschichtungsentwicklung wider; die Zusammensetzung muss mit der Galvanisierungslösung kompatibel sein, um Haftungsprobleme durch Elemententmischung zu vermeiden. Aus Umweltgründen werden Prinzipien für die Verwendung von Recyclingmaterialien angewendet, jedoch muss der Gehalt an Verunreinigungen wie Sauerstoff und Kohlenstoff kontrolliert werden, um die Bildung spröder Phasen zu verhindern.

### 3.3.1 Leistungsorientierte Logik zur Optimierung der Zusammensetzung von Wolframlegierungsblechen

Die leistungsorientierte Optimierungslogik für die Zusammensetzung von Wolframlegierungsblechen geht von den Anforderungen der Endanwendung aus und leitet daraus die Elementverhältnisse und die Reihenfolge der Zugabe ab. So wird ein ausgewogenes Verhältnis von Eigenschaften wie Dichte, Härte, Wärmeleitfähigkeit und Duktilität sichergestellt. Zunächst werden die Schlüsseleigenschaften identifiziert. Beispielsweise wird bei dem Ziel einer hohen Dichte der Wolframanteil erhöht, während die Bindemittelphase feinabgestimmt wird, um die Verarbeitbarkeit zu erhalten. Der Optimierungsprozess umfasst mehrere Iterationen: Das Ausgangsverhältnis wird anhand des Phasendiagramms zur Bestimmung des Flüssigphasenanteils abgeschätzt. Nach experimenteller Überprüfung werden Anpassungen vorgenommen, um die Sinterschrumpfrate zu erreichen. Die Logik betont die Synergie zwischen den Elementen. Nickel beispielsweise erhöht die Duktilität, während Eisen oder Kupfer die Festigkeit bzw. die Wärmeleitfähigkeit verbessern. Durch Optimierung ihres Verhältnisses lässt sich die thermische Stabilität steigern. Mikrodotierung dient als Feinabstimmungsmethode: Seltenerdelemente verfeinern das Mikrogefüge, und Bor und Phosphor verbessern die Korrosionsbeständigkeit durch Anpassung der Grenzfläche.

Die Logik berücksichtigt auch Kompromisse bei der Leistungsfähigkeit. Für eine hohe Härte wird der Wolframgehalt erhöht und Carbide hinzugefügt. Der damit einhergehende Rückgang der Zähigkeit muss jedoch überwacht und durch Optimierung des Glühprozesses wiederhergestellt werden. Zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit wird der Kupferanteil erhöht, wobei ein zu hoher Anteil an flüssiger Phase und damit eine poröse Mikrostruktur vermieden werden muss. Chemische Simulationswerkzeuge unterstützen die Optimierung, indem sie Phasenbildungswege vorhersagen und so die Anzahl der Versuchszyklen reduzieren. Rückmeldungen aus der thermomechanischen Verarbeitung fließen in die Logik ein; die Analyse von Walzfehlern dient der Feinabstimmung der Zusammensetzung, beispielsweise durch die Zugabe von Kobalt zur Verbesserung der Verformungskoordination. Im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit konzentriert sich die Optimierung auf die Bildung korrosionsbeständiger Phasen. Das Zugabeverhältnis von Chrom oder Molybdän wird je nach Medium angepasst. Die Gesamtlogik bildet einen geschlossenen Kreislauf: Anforderungsdefinition – Zusammensetzungsdesign – Herstellungsprüfung – Leistungsprüfung – iterative Optimierung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dadurch wird eine enge Korrelation zwischen Zusammensetzung und Leistung gewährleistet. Dank dieser Logik können Wolframlegierungsbleche an vielfältige Anforderungen in Bereichen wie Präzisionsinstrumenten und Wärmemanagement angepasst werden, was die Praxisorientierung des Materialdesigns unterstreicht.

### 3.3.2 Chemische Kontrollverfahren zur Sicherstellung der Zusammensetzungshomogenität von Wolframlegierungsblechen

Die chemische Kontrolle der Zusammensetzungshomogenität von Wolframlegierungsblechen wird hauptsächlich durch Pulvermischen, Anpassung der Sinterparameter und Wärmebehandlungsdiffusion erreicht. Diese Methoden gewährleisten die Qualitätskontrolle in jeder Phase vom Ausgangsmaterial bis zum fertigen Produkt und vermeiden Leistungsschwankungen aufgrund von Entmischung und Inhomogenität. Im Pulvermischprozess werden Methoden wie mechanisches Legieren oder Sprühtrocknen eingesetzt, um eine gleichmäßige Verteilung von Elementen wie Wolfram, Nickel und Eisen im Mikrometerbereich sicherzustellen. Chemische Zusätze wie Tenside unterstützen die Pulverdispersion. Bei der Sinterkontrolle ist die Regulierung der Flüssigphasenmenge entscheidend. Die Gestaltung eines Temperaturgradienten fördert eine gleichmäßige Benetzung, und der Wasserstoffstrom entfernt flüchtige Verunreinigungen und reduziert so lokale Anreicherungen. Die Anpassung der Abkühlgeschwindigkeit unterdrückt eine ungleichmäßige Elementdiffusion, und schnelles Abkühlen fixiert einen homogenen Zustand.

Wärmebehandlungsverfahren umfassen Vakuumglühen, um die Diffusion auf atomarer Ebene zu fördern, Konzentrationsgradienten zu beseitigen und das Material durch mehrere Glühzyklen weiter zu homogenisieren. Oberflächenchemische Verfahren wie Ionenimplantation oder chemische Gasphasenabscheidung erzeugen eine gleichmäßige Schicht auf der Blechoberfläche und verbessern so die Gesamtkonsistenz. In der Qualitätskontrolle steuert die chemische Analyse die Methodenoptimierung, beispielsweise durch Anpassung der Materialanteile nach dem Auffinden von Entmischungsbereichen mittels Spektroskopie. Umweltfreundliche Verfahren verwenden vorlegierte Pulver, um das Risiko einer ungleichmäßigen Vermischung zu minimieren.

### 3.3.3 Einfluss von Verunreinigungselementen auf die Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen

Verunreinigungen in Wolframlegierungsblechen stammen hauptsächlich aus dem Rohwolframpulver, dem Bindemittelpulver, während der Verarbeitung eingebrachten Gasen und Anlagenrückständen. Selbst extrem geringe Mengen können die Mikrostruktur, das mechanische Verhalten und die Umweltbeständigkeit erheblich beeinträchtigen. Zu den häufigsten Verunreinigungen zählen Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Schwefel, Silizium, Kalium, Natrium und Kalzium, wobei Sauerstoff und Kohlenstoff den größten Einfluss haben.

Wenn Sauerstoff in freier oder oxidiert Form vorliegt, bildet er leicht einen dünnen Oxidfilm auf der Oberfläche von Wolframpartikeln. Dies verringert die Benetzbarkeit beim Flüssigphasensintern,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

schwächt die Grenzflächenbindung und führt zu lokalisierten Mikroporen oder Einschlüssen. Dadurch wird die Bruchzähigkeit reduziert und die Neigung zu Walzrissen erhöht. Sauerstoff reagiert zudem bei hohen Temperaturen mit Wolfram unter Bildung flüchtiger Oxide. Dies führt zu einer Aufrauung der Wolframpartikeloberfläche, behindert die Partikelumlagerung und beeinflusst die Enddichte. Die Wirkung von Kohlenstoff ist komplexer: Spuren Mengen können mit Wolfram feine Carbide bilden und so zu einer gewissen Dispersionshärtung beitragen. Überschüssiger Kohlenstoff hingegen segregiert an Korngrenzen oder Grenzflächen und bildet sprödes WC oder  $W_2C$ . Dies schwächt die Grenzflächenfestigkeit erheblich und erhöht die Neigung zu interkristallinem Bruch unter Belastung. Stickstoff wird üblicherweise unter Hochtemperatur-Wasserstoffatmosphäre reduziert und entfernt. Restlicher Stickstoff bildet jedoch mit Wolfram nadelförmige Nitridphasen, die ebenfalls als Ausgangspunkte für Risse dienen können. Selbst Spuren von Elementen wie Phosphor und Schwefel reichern sich leicht in der Bindemittelphase oder an der Grenzfläche an, bilden niedrigschmelzende Verbindungen, verringern die Hochtemperaturfestigkeit und führen zu Heißversprödung. Alkalimetalle wie Kalium und Natrium sowie Calcium und Silicium stammen hauptsächlich aus Rückständen des Wolframatverfahrens zur Herstellung von Wolframpulver. Sie verflüchtigen sich oder bilden Poren während des Sinterns, wodurch die Kontinuität der Struktur gestört wird und in schweren Fällen Blasenbildung oder Delamination auftreten.

Verunreinigungen haben zudem einen synergistischen Effekt auf die Eigenschaften. Beispielsweise begünstigt das gleichzeitige Vorhandensein von Sauerstoff und Phosphor die Bildung einer Phosphatglasphase, welche Wolframpartikel einkapselt, den Lösungs- und Wiederausfällungsprozess behindert und zu unregelmäßigen Formen der Wolframpartikel führt, wodurch deren Kugelform reduziert wird. Bei hohen Temperaturen neigen Bereiche mit hohen Verunreinigungen zu Oxidations- oder Korrosionsstellen, was den Materialversagen beschleunigt. Bei der Herstellung ultradünner Bleche können kleinste, durch Verunreinigungen verursachte Defekte verstärkt werden und den Ausgangspunkt für Kantenrisse oder orangenhautartige Oberflächenfehler bilden. Daher stellt die moderne Produktion von Wolframlegierungsblechen immer höhere Anforderungen an die Reinheit der Rohstoffe und die Prozessreinheit, und die Kontrolle von Verunreinigungen ist zu einem der Schlüsselfaktoren für den Einsatz eines Materials in anspruchsvollen Anwendungen geworden.

### 3.3.4 Verfahren zur Entfernung von Verunreinigungen aus Wolframlegierungsblechen

Die Wolframlegierungsbleche werden entlang der gesamten Prozesskette von der Rohmaterialaufbereitung bis zur Wärmebehandlung des fertigen Produkts verarbeitet. Dabei kommen verschiedene Verfahren wie chemische Reinigung, physikalische Raffination, atmosphärische Reinigung und Nachbehandlung zum Einsatz, um ein mehrstufiges Reinigungssystem zu bilden.

Die Reinigung der Rohstoffe ist von entscheidender Bedeutung. Wolframpulver wird typischerweise aus hochreinem Ammoniumwolframat hergestellt. Durch mehrfache Umkristallisation und intensive Wasserstoffreduktion werden Verunreinigungen wie Sauerstoff, Alkalimetalle und Phosphor auf ein niedriges Niveau reduziert. Nickel-, Eisen- und Kupferpulver für die Bindemittelphase werden mittels Carbonyl- oder Elektrolyseverfahren gewonnen und anschließend im Vakuum entgast, um den Gehalt

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



an Kohlenstoff, Sauerstoff und Schwefel weiter zu senken. Vor dem Mischen wird das Wolframpulver häufig einer zweiten Hochtemperatur-Wasserstoffreinigung unterzogen. Dabei wird die Reduktion von Oxiden durch Wasserstoff genutzt, um Wasserdampf zu erzeugen, der anschließend abgeleitet wird und gleichzeitig verbleibende flüchtige Verunreinigungen wie Kalium und Natrium mitnimmt.

Die Sinterphase ist ein entscheidendes Zeitfenster für die Entfernung gasförmiger und flüchtiger Verunreinigungen. Eine feuchte Wasserstoffatmosphäre (mit streng kontrolliertem Taupunkt) reduziert effizient Oxide auf der Oberfläche der Wolframpartikel und führt Wasserdampf aus dem Ofen ab; trockener Wasserstoff oder Hochvakuumsintern dienen der Entfernung von Stickstoff und restlichen Kohlenwasserstoffen. Um die Rekondensation niedrigschmelzender Verunreinigungen wie Phosphor und Schwefel nach der Verflüchtigung zu verhindern, wird häufig ein stufenweises Heizverfahren angewendet: Zunächst erfolgt die Entgasung bei niedrigerer Temperatur, anschließend wird die Temperatur rasch auf die Flüssigphasensintertemperatur erhöht. Die Isolierschicht zwischen Ofenbeschickung und Rohling muss aus hochreinem Graphit oder Aluminiumoxid bestehen, um Sekundärverunreinigungen zu vermeiden.

Die Entgasung bei der Warmumformung und Wärmebehandlung erfolgt primär mittels Hochvakuum oder hochreinem, strömendem Wasserstoff. Das Vorwärmen vor dem Warmwalzen wird in einem Vakuumofen durchgeführt, um restliche Alkalimetalle weiter zu verdampfen. Mehrere Zwischenglühungen nach dem Kaltwalzen erfolgen ebenfalls unter Hochvakuumbedingungen, wodurch Restgase durch Diffusion entweichen können. Bei der Herstellung ultradünner Folien wird häufig ein spezielles Vakuum-Entgasungsglühverfahren eingesetzt, um Mikroporen in Dickenrichtung zu vermeiden.

Die Nachbehandlung zielt auf die Entfernung von Oberflächenverunreinigungen oder oberflächennahen Verunreinigungen ab. Chemisches Beizen kann sauerstoff- und phosphorreiche Schichten an der Oberfläche selektiv auflösen; Elektropolieren oder Plasmareinigung können adsorbierte organische Stoffe und Metallionen effektiv entfernen; Vakuumwärmebehandlung mit Titan-Gettern kann restlichen Sauerstoff und Stickstoff tiefgehend binden. Einige hochwertige Bleche werden zur Endreinigung des Rohlings auch durch Zonenschmelzen oder Elektronenstrahlschmelzen veredelt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Entfernung von Verunreinigungen in Wolframlegierungsblechen einer dreistufigen Strategie folgt: „Quellenkontrolle – Prozessoptimierung – Endproduktveredelung“. Durch den Synergieeffekt mehrerer Methoden kann der Sauerstoffgehalt stabil in einem extrem niedrigen Bereich gehalten und andere schädliche Verunreinigungen ebenfalls deutlich reduziert werden. Dies bildet die Grundlage für die hohe Zuverlässigkeit und lange Lebensdauer des Materials.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Kapitel 4 Der Zusammenhang zwischen Struktur und Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen

### 4.1 Mikrostruktur von Wolframlegierungsblech

Die Mikrostruktur von Wolframlegierungsblechen weist typischerweise einen zweiphasigen Verbundcharakter auf. Wolframpartikel bilden die harte Phase und sind von Nickel- oder Kupfer-basierten Bindemittelphasen umhüllt, wodurch eine cermetartige Mikrostruktur entsteht. Diese Struktur entsteht in der Pulvermetallurgie und entwickelt sich nach dem Sintern durch thermomechanische Bearbeitung weiter. Die Wolframpartikel sind meist nahezu kugelförmig oder polyedrisch, und ihre Größenverteilung beeinflusst die Strukturhomogenität. Die Bindemittelphase füllt die Zwischenräume zwischen den Partikeln und bildet so kontinuierliche Verformungskanäle. Defekte wie Porosität und Versetzungen sind in der Struktur unvermeidbar, können aber durch Prozesskontrolle minimiert werden. Die Mikrostruktur umfasst auch Grenzflächenschichten, in denen durch Elementdiffusion gebildete Übergangszonen die Phasenbindung verbessern. Beobachtungsmethoden wie Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) zeigen Strukturdetails und tragen zur Analyse der Ursache der Eigenschaften bei. Die Strukturentwicklung variiert mit den Verarbeitungsstufen; die Partikel kugelförmig werden beim Sintern und faserig beim Walzen.

#### 4.1.1 Chemische Zusammensetzung der Kornstruktur und der Korngrenzen

Wolframlegierungsbleche bestehen hauptsächlich aus kubisch-raumzentrierten (krz) Kristallen der Wolframphase und kubisch-flächenzentrierten (kfz) Kristallen der Binderphase. Erstere nehmen den größten Teil des Volumens ein und bilden die Grundlage für hohe Härte und Dichte, während letztere als durchgehende Matrix die Gesamtplastizität verbessern. Beim Sintern kugeln sich die Wolframkörner durch einen Lösungs-Wiederfällungs-Mechanismus allmählich aus. Anfänglich polygonale Partikel neigen unter dem Einfluss der flüssigen Phase zu einer gleichmäßigen Oberflächenkrümmung und bilden schließlich Aggregate relativ einheitlicher Größe. Diese Strukturentwicklung wird durch die Benetzbarkeit der Binderphase beeinflusst; gute Benetzung fördert die Partikelumlagerung, verringert die Kontaktwinkel und bildet energiearme Korngrenzen. Die Korngröße wird üblicherweise durch die Pulverpartikelgröße und die Sintertemperatur gesteuert. Feines Pulver und lange Haltezeiten begünstigen kleine Kornstrukturen, verbessern die Festigkeit, können aber die Duktilität verringern. Durch das Walzen wird eine verformungsinduzierte Rekristallisation bewirkt, wodurch sich die Körner in Walzrichtung verlängern und faserige Texturen bilden, was die anisotropen Eigenschaften weiter optimiert.

Die chemische Zusammensetzung der Korngrenzen spielt eine entscheidende Rolle in Wolframlegierungsblechen, insbesondere hinsichtlich der Elementverteilung an der Grenzfläche zwischen Wolfram und Bindemittel. An dieser Grenzfläche reichern sich häufig geringe Mengen an Wolframatomen an, die aus der Bindemittelphase ausscheiden und eine dünne Mischkristallschicht bilden, welche die Haftfestigkeit erhöht. In Nickel-Eisen-Systemen neigt Eisen zur Segregation an den

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korngrenzen, wodurch die Elektronendichte reguliert und die Versetzungswege beeinflusst werden. Kupfersysteme weisen eine gleichmäßige Kupferverteilung an der Grenzfläche auf, was die Kontinuität der Wärmeleitkanäle fördert. Spuren von Verunreinigungen wie Sauerstoff und Phosphor reichern sich an den Korngrenzen an und können Verbindungsschichten bilden, die die Grenzflächenenergien verändern. Diese müssen durch Reinigungsprozesse kontrolliert werden, um eine Versprödung zu vermeiden. Die chemische Zusammensetzungsanalyse nutzt üblicherweise energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDS) oder Atomsonde-Mikroanalyse, um Gradientenänderungen an der Grenzfläche sichtbar zu machen. Dieser Gradient trägt zur Spannungsabsorption und zur Reduzierung der Rissausbreitung bei.

Darüber hinaus ist die Stabilität der Kornstruktur eng mit der Zusammensetzung der Korngrenzen verknüpft. Hochvakuumsintern kann die Bildung von Sauerstoffoxiden an der Grenzfläche unterdrücken, eine saubere Grenzfläche gewährleisten und die Zuverlässigkeit im Hochtemperaturbetrieb verbessern. Glühen passt die Zusammensetzung durch Diffusion an, verdünnt segregierende Elemente und stellt das strukturelle Gleichgewicht wieder her. Es gibt verschiedene Korngrenzentypen; Großwinkelkorngrenzen begünstigen die Elementmigration, während Kleinwinkelkorngrenzen stabiler sind. Prozessparameter wie die Reduktion beeinflussen die Korngrenzendichte; hohe Korngrenzendichten können Versetzungen fixieren und die Härte erhöhen. Bei Kontakt mit der Umgebung bestimmt die Korngrenzenzusammensetzung den Korrosionsweg, und die Anreicherung passivierender Elemente kann einen Schutzfilm bilden.

#### 4.1.2 Verteilung und chemischer Zustand der Legierungsphasen

Die Legierungsphasen in Wolframlegierungsblechen bestehen hauptsächlich aus Wolfram-Mischkristallphasen und Bindemittel-Mischkristallphasen. Erstere bestehen aus Legierungselementen mit begrenzter Löslichkeit innerhalb der Wolframkörner, während letztere aus in einer Nickel- oder Kupfermatrix gelösten Wolframatomen bestehen. Die Wolframphase ist gleichmäßig als diskrete Partikel in die Bindemittelphase eingebettet und bildet ein Verbundnetzwerk. Der Partikelabstand wird durch das Volumenverhältnis der Bindemittelphase bestimmt; ein geringerer Abstand begünstigt eine gleichmäßige Spannungsverteilung. Chemisch weist die Wolframphase einen hohen Reinheitsgrad auf, und an der Oberfläche kann eine dünne Oxid- oder Mischkristallübergangszone vorliegen. Die Bindemittelphase besitzt einen komplexeren chemischen Zustand. Im Nickel-Eisen-System handelt es sich um einen  $\gamma$ -Mischkristall, in dem Eisenatome teilweise Nickelpositionen ersetzen und eine ungeordnete Anordnung bilden. Dieser Zustand ist stabil, jedoch kann sich bei Temperaturänderungen eine geordnete Phase ausscheiden. Im Kupfersystem verhält es sich ähnlich; Kupfer und Nickel sind unendlich gut mischbar, was einen homogenen Zustand gewährleistet und keine Tendenz zur Phasentrennung ausschließt.

Die Optimierung der Phasenverteilung hängt von der Sinterkinetik ab. Die Umlagerung von Partikeln in der flüssigen Phase führt zu einer zufälligeren Verteilung und verhindert so die Agglomeration. Eine Wärmebehandlung homogenisiert die Verteilung zusätzlich; die diffusionsbedingte Anpassung der Partikelgrenzen reduziert lokale Dichteunterschiede. Der chemische Zustand wird von der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Abkühlgeschwindigkeit beeinflusst: Schnelles Abkühlen fixiert einen übersättigten Zustand, während langsames Abkühlen die Ausfällung fördert und feine, verstärkende Phasen bildet. Der chemische Zustand an der Grenzfläche ist einzigartig und weist Bereiche mit Elementgradienten auf; Wolfram geht allmählich von den Partikeln in die Bindemittelphase über und verbessert so die Kompatibilität. Beobachtungstechniken wie die Röntgenbeugung bestätigen den Zustand und zeigen keine schädlichen Verbindungsspeaks. Eine ungleichmäßige Verteilung kann zu Leistungsgradienten führen, weshalb eine anfängliche Homogenisierung durch Rühren und Mischen erforderlich ist. Während des Glühens umfasst die Zustandsentwicklung die Rekristallisation, wodurch Kristallfehler reduziert und die Leitfähigkeit verbessert werden.

Des Weiteren beeinflusst die Wechselwirkung zwischen Phasenverteilung und Zustand das Verhalten unter Umwelteinflüssen. Eine gleichmäßig verteilte Binderphase bietet kontinuierlichen Schutz, während ein chemisch stabiler Zustand Oxidation widersteht. Während der Verarbeitung, beim Walzen und Strecken, verteilt sich die Phase und bildet eine orientierte Struktur. Der Zustand bleibt erhalten, jedoch führt die Verformung zu einer Versetzungsanhäufung.

#### 4.1.3 Chemische Ursprungsanalyse von Defektstrukturen

Wolframlegierungsbleche weisen hauptsächlich Punkt-, Linien-, Oberflächen- und Volumendefekte auf. Ihre chemischen Ursachen liegen in der ungleichmäßigen Elementdiffusion, Phasengrenzflächenreaktionen und dem Eintrag von Verunreinigungen. Punktdefekte wie Leerstellen und Zwischengitteratome entstehen häufig durch die Auflösung und Ausfällung von Wolframatomten in der Binderphase während des Sinterprozesses; übersättigtes Wolfram führt zu einer erhöhten Leerstellenkonzentration. Liniendefekte, d. h. Versetzungen, hängen mit der Walzverformung zusammen; die Mischkristallverfestigung in der Binderphase erhöht die Versetzungsdichte, und chemisch gesehen fixieren Eisen- oder Kupferatome Versetzungen und beeinflussen deren Bewegung. Oberflächendefekte wie Korngrenzen und Phasengrenzen werden chemisch durch die Anreicherung von Verunreinigungen verursacht; Sauerstoff und Phosphor reichern sich an der Grenzfläche an und bilden Verbindungen, wodurch sich ihre Energiezustände verändern. Volumendefekte wie Porosität und Einschlüsse entstehen durch unvollständiges Sintern aufgrund von Restgasen oder nicht entfernten Oxiden.

Die Analyse ergab, dass die Defektbildung auch thermodynamisch bedingt ist: Hochtemperaturdiffusion fördert die Leerstellenwanderung, während Tieftemperaturerstarung Cluster bildet. Verunreinigungen haben einen signifikanten chemischen Einfluss; Kohlenstoff und Stickstoff bilden interstitielle Verbindungen, die das Defektvolumen erhöhen. Tempern reduziert Defekte, heilt Leerstellen durch Diffusion und verteilt Verunreinigungen im chemischen Gleichgewicht neu. Grenzflächendefekte haben spezifische Ursachen: Unterschiede in der Wärmeausdehnung induzieren Mikrorisse, und Elementgradienten bauen Spannungen ab. Beobachtungsmethoden wie die Elektronenmikroskopie decken die Ursachen auf, während energiedispersive Röntgenspektroskopie Korrelationen mit Verunreinigungen aufzeigt. Der Einfluss von Defekten auf die Leistung muss kontrolliert werden; chemische Reinigung verringert die Intensität ihrer Entstehung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 4.2 Eigenschaften und Wirkungsmechanismen von Wolframlegierungsblechen

Wolframlegierungsbleche zeichnen sich hauptsächlich durch ihre einzigartige Verbundstruktur aus. Die Wechselwirkung zwischen der Wolframphase und der Bindemittelphase beeinflusst verschiedene Eigenschaften wie Dichte, Wärmeleitfähigkeit und thermische Stabilität. Der Wirkungsmechanismus umfasst chemische Prozesse wie die atomare Packung, den Elektronentransport und die Grenzflächenbindung. So resultiert beispielsweise die hohe Dichte aus der dichten Anordnung der Wolframatomate, während die thermische und elektrische Leitfähigkeit von den Migrationspfaden freier Elektronen abhängt. Der Mechanismus der thermischen Stabilität basiert auf dem thermodynamischen Gleichgewicht der Phasenstruktur, wobei die Grenzflächenbindung die Verformung bei hohen Temperaturen hemmt. Mechanistische Analysen tragen zum Verständnis der Wirkungsursachen bei, beispielsweise wie der Walzprozess die Elektronenstreuung und damit die Leitfähigkeit beeinflusst. Unter dem Einfluss von Umwelteinflüssen spielt auch das Oxidationsverhalten eine Rolle, wobei der chemische Oberflächenzustand die Stabilität beeinflusst.

### 4.2.1 Das Prinzip der hochdichten chemischen Atompäckung in Wolframlegierungsblechen

Das Prinzip der hochdichten chemischen Atompäckung von Wolframlegierungsblechen basiert hauptsächlich auf der hohen Atommasse der Wolframatomate und der kompakten Anordnung ihrer kubisch-raumzentrierten Kristallstruktur. Diese Struktur ermöglicht es den Atomen, einen begrenzten Raum effizient auszufüllen, und der Legierungsprozess optimiert die Packungsmethode zusätzlich. Durch die Pulvermetallurgie erfährt das Wolframpulver während des Sinterns eine Partikelumlagerung, und das flüssige Bindemittel fördert die Annäherung der Wolframatomate, wodurch ein dichtes Netzwerk entsteht. Das Prinzip der Atompäckung beruht auf dem Zusammenwirken von Van-der-Waals-Kräften und metallischen Bindungen. Wolframatomate besitzen einen relativ großen Radius, aber eine moderate Gitterkonstante, wodurch minimale interatomare Lücken innerhalb der kubisch-raumzentrierten Einheit gewährleistet werden. Die Zugabe von Legierungselementen wie Nickel und Eisen verändert die Packung der Wolframphase nicht direkt, sondern passt das Gesamtvolumen durch Mischkristallbildung an und reduziert so Leerstellen.

Das Stapelprinzip spiegelt sich auch in der Wechselwirkung zwischen den Phasen wider. Die Atome der Binderphase füllen die Zwischenräume zwischen den Wolframpartikeln, ähnlich wie eine Flüssigkeit eine feste Oberfläche benetzt, und die chemische Bindung verstärkt die Verbindungsstärke. In der Sinterkinetik treibt die Oberflächenenergie die atomare Migration an, und Wolfram-Oberflächenatomate diffundieren in die Vertiefungen, wodurch eine gleichmäßige Stapelung erreicht wird. Während der Abkühlung komprimiert die thermische Kontraktion den interatomaren Abstand weiter, und unter chemischem Gleichgewicht ausgefällte Phasen tragen zur Stabilisierung der Struktur bei. Mikroskopisch manifestiert sich dieses Prinzip in der Ordnung des Wolframgitters; die Substitutionsmischkristalle begrenzen die Gitterausdehnung und erhalten so einen hohen Füllfaktor aufrecht. Makroskopisch betrachtet resultiert die hohe Dichte aus dieser atomaren Kompaktheit, wodurch sich das Material für Anwendungen eignet, die eine konzentrierte Masse erfordern.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Weitere Analysen zeigen, dass das Packungsprinzip von der Elektronegativität der Elemente beeinflusst wird. Der Elektronegativitätsunterschied zwischen Wolfram und den Elementen der Bindemittelphase fördert die gemeinsame Nutzung von Elektronen und bildet so ein stabiles Bindungsnetzwerk. Die einzigartige Atompackung an der Grenzfläche mit ihrem Gradientenbereich ermöglicht es Wolframatom, sich schrittweise in die Bindemittelphase zu integrieren und so die Gesamtkohärenz zu verbessern. Prozessparameter wie Temperaturgradienten steuern den Packungsprozess, wobei hohe Temperaturen die Diffusionszeit verlängern und die Füllgleichmäßigkeit optimieren. Verunreinigungen stören den Prozess; Verbindungen aus Sauerstoff und anderen Elementen belegen Platz und müssen unter reduzierender Atmosphäre entfernt werden. Durch Tempern wird die Packungsordnung wiederhergestellt, und Diffusion schließt Hohlräume. Bei der Anpassung an Umwelteinflüsse gewährleistet dieses Prinzip eine relativ stabile Dichte unter Temperaturschwankungen und unterstützt somit die Langzeitnutzung.

#### 4.2.2 Chemischer Trägermechanismus für die thermische und elektrische Leitfähigkeit von Wolframlegierungsblechen

Die Wärmeleitfähigkeit von Wolframlegierungsblechen beruht hauptsächlich auf dem Transport freier Elektronen und Phononen. Die Wolframphase sorgt für eine hohe Elektronendichte, während die Bindemittelphase den Transportweg optimiert und so ein zusammengesetztes Ladungsträgersystem bildet. Der Leitfähigkeitsmechanismus basiert auf der gemeinsamen Nutzung von Elektronen innerhalb der metallischen Bindungen. Die äußeren Elektronen der Wolframatom lösen sich leicht ab und bilden ein Elektronengas. Die Zugabe von Nickel- oder Kupferatomen durch Legieren erhöht die Ladungsträgerkonzentration. Die Wärmeleitfähigkeit wird durch Phononenschwingungen erreicht, wobei sich Gitterschwingungen in der Wolframphase effizient ausbreiten und die Bindemittelphase die Streuung puffert. Die chemische Grundlage dieses Mechanismus liegt in der Valenzelektronenkonfiguration: Die d-Elektronenschicht des Wolframs hybridisiert mit den sp-Elektronen der Bindemittelphase und erhöht so die Ladungsträgermobilität.

Der Ladungsträgermechanismus spiegelt sich auch in der Phasenverteilung wider: Die kontinuierliche, gebundene Phase bildet ein leitfähiges Netzwerk, reduziert den Grenzflächenwiderstand, und die chemische Stabilität gewährleistet einen ungehinderten Elektronenfluss. Der Sinterprozess optimiert diesen Mechanismus, indem die flüssige Phase eine saubere Grenzfläche fördert und die Potenzialbarriere senkt. Obwohl abgekühlte Ausscheidungen Ladungsträger streuen können, verbessert eine geeignete Verstärkung die Wärmeleitfähigkeit. Mikroskopisch betrachtet, ist die Form der Fermi-Fläche Teil des Mechanismus; Legierungselemente beeinflussen die elektronische Struktur und damit die effektive Masse der Ladungsträger. Makroskopisch gesehen unterstützt dieser Mechanismus das Wärmemanagement und elektronische Anwendungen und erzielt ein Gleichgewicht zwischen thermischer und elektrischer Leitfähigkeit.

Des Weiteren wird der Mechanismus durch Defektchemie beeinflusst, wobei Versetzungen oder Leerstellen Ladungsträger streuen, was durch Tempern reduziert werden muss. Verunreinigungen wie Sauerstoff bilden Haftstellen, die Elektronen einfangen und die Leitfähigkeit verringern;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Reinigungsprozesse mindern diesen Effekt. In Abhängigkeit von der Temperatur zeigt der Mechanismus eine Elektron-Phonon-Kopplung; hohe Temperaturen erhöhen die Streuung, die Stabilität der Wolframphase bleibt jedoch auf einem grundlegenden Niveau. Oberflächenchemische Zustände beeinflussen den Mechanismus; Oxidschichten blockieren Ladungsträger, während Beschichtungen schützen und die Leistung wiederherstellen. Während der Verarbeitung induziert das Walzen eine Textur, und Orientierungsmechanismen verbessern die anisotrope Leitfähigkeit. Unter dem Einfluss von Umwelteinflüssen verändert Korrosion den Ladungsträgerpfad, und Passivierungsschichten tragen zu dessen Erhaltung bei.

#### **4.2.3 Chemische Struktur zur Unterstützung der thermischen Stabilität von Wolframlegierungsblechen**

Die Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen beruhen primär auf dem thermodynamischen Gleichgewicht der Zweiphasenstruktur. Der hohe Schmelzpunkt der Wolframphase bildet das Stützgerüst, während die feste Lösung der Binderphase die Spannungsverteilung reguliert und Verformungen bei hohen Temperaturen verhindert. Das chemische Prinzip der strukturellen Unterstützung beruht auf der Phasengrenzflächenbindung. Eine Mischung aus metallischen und kovalenten Komponenten gewährleistet, dass das Bindungsnetzwerk auch bei hohen Temperaturen stabil bleibt. Die beim Sintern entstehende Grenzschicht erzeugt durch Elementdiffusion eine Gradientenstruktur, die Wärmeausdehnungsunterschiede ausgleicht und die Gesamtstabilität erhält. Der Abkühlprozess fixiert die Stützstruktur, und ausgeschiedene Phasen blockieren Korngrenzen und verhindern deren Migration.

Der Stützmechanismus spiegelt sich auch in der Mikrostrukturstabilität wider: Die Sphäroidisierung der Wolframpartikel reduziert die Spannungskonzentration, und die gleichmäßige Verteilung der Binderphase verteilt die thermische Belastung. Chemisch gesehen erhöht die Mischkristallverfestigung den Schmelzpunkt der Phase, während Legierungselemente die freie Energie anpassen und die Triebkraft der Phasenumwandlung verringern. Mikroskopisch betrachtet, beruht die Stützwirkung auf harmonischen Atomschwingungen und koordinierten Phononenmoden zwischen den Phasen, wodurch lokale Erweichungen verhindert werden. Makroskopisch gesehen unterstützt diese Stützwirkung Hochtemperaturanwendungen, und ihre Stabilität wird bei zyklischer Erwärmung nachgewiesen.

Weitere Analysen zeigen, dass der Mechanismus durch Oxidationschemie beeinflusst wird. Dabei bildet sich ein Schutzfilm auf der Oberfläche, der die Sauerstoffdiffusion blockiert und gleichzeitig die innere Struktur erhält. Verunreinigungen stören die Trägerstruktur; Phosphor und andere Elemente induzieren spröde Phasen, die durch Hochreinheitsprozesse entfernt werden. Durch Glühen wird die Trägerstruktur optimiert, Diffusion passt die Zusammensetzung an und stellt das Gleichgewicht wieder her. In einem Temperaturgradienten zeigt der Träger ein graduelles Verhalten: Die Wolframphase dominiert im Tieftemperaturbereich, während die Binderphase im Hochtemperaturbereich eine unterstützende Rolle spielt. Auch die Verarbeitungsgeschichte beeinflusst den Mechanismus; vorherige Verformungen führen zu einem Versetzungsnetzwerk, das die Hochtemperaturfestigkeit erhöht. Korrosionsprüfungen unter

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

Umwelteinflüssen belegen die Zuverlässigkeit des Trägers, und die chemisch inerte Phase verlängert seine Lebensdauer.

#### **4.3 Korrelation zwischen mechanischen und chemischen Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen**

Die Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen spiegeln sich hauptsächlich darin wider, wie die Mikrostruktur des Materials das makroskopische Verhalten durch chemische Bindungen und die Verteilung der Elemente beeinflusst. Dieser Zusammenhang trägt zum Verständnis der Ursprünge von Eigenschaften wie Härte, Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit bei. Mechanische Eigenschaften wie Festigkeit und Zähigkeit resultieren oft aus der Gitteranordnung und den Wechselwirkungen zwischen den Phasen, während chemische Eigenschaften wie Korrosionsbeständigkeit Oberflächenreaktionen und das elektrochemische Verhalten der Elemente umfassen. Diese beiden Aspekte sind durch die Grenzflächenchemie eng miteinander verknüpft. Beispielsweise bietet das harte Gerüst der Wolframphase mechanische Stabilität, während die feste Lösung der Bindemittelphase die chemische Stabilität moduliert, wodurch ein ausgewogenes Leistungsverhältnis entsteht. Der Korrelationsmechanismus beinhaltet den Beitrag der Bindungsstärke auf atomarer Ebene; metallische Bindungen dominieren die Härte in der Wolframphase, während kovalente Komponenten die Bindung an der Grenzfläche verstärken und so die Verformungsbeständigkeit beeinflussen. Chemische Reaktionen während des Sinterprozesses formen die Struktur, die flüssige Phase fördert die Elementdiffusion, wodurch Gradientenbereiche entstehen, die Spannungskonzentration mechanisch reduzieren und die Oxidationsbeständigkeit chemisch erhöhen.

Die Wärmebehandlung verstärkt diesen Zusammenhang zusätzlich; durch Glühen werden die Elementpositionen mittels Diffusion angepasst, wodurch die mechanische Plastizität und die chemische Inertheit optimiert werden. Unter dem Einfluss von Umweltfaktoren äußert sich dieser Zusammenhang in einer synergistischen Wirkung auf die Leistung; Feuchtigkeit oder saure Medien können gleichzeitig die mechanische Festigkeit und die chemische Schutzschicht schwächen. Die Verarbeitungsgeschichte beeinflusst den Zusammenhang; das durch Walzen eingebrachte Versetzungsnetzwerk erhöht die mechanische Festigkeit und verändert die Elektronenverteilung chemisch, was das Korrosionspotenzial beeinflusst. Die Rolle von Verunreinigungen darf nicht vernachlässigt werden; die Anreicherung von Sauerstoff oder Phosphor führt chemisch zur Bildung von Bereichen mit schwachen Bindungen und mechanisch zu Rissinitiierungsstellen, weshalb eine Reinigung erforderlich ist, um diese Effekte zu minimieren.

##### **4.3.1 Zusammenhang zwischen Härte und chemischer Bindungsstärke von Wolframlegierungsblechen**

Wolframlegierungsblechen basiert auf der Vielfalt und Stärkeverteilung der Bindungstypen im Material. Diese Beziehung verdeutlicht, wie die Wechselwirkung zwischen der Wolframphase und der Bindemittelphase gemeinsam zur Verformungsbeständigkeit des Materials beiträgt. Die Härte, als mechanischer Indikator, resultiert aus der Stärke interatomarer Wechselwirkungen, während die

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



Festigkeit chemischer Bindungen von der Bindungsenergie und dem Grad der Elektronenpaarbindung beeinflusst wird. In Wolframlegierungsblechen wird die kubisch-raumzentrierte Struktur der Wolframphase von metallischen Bindungen dominiert, die eine hohe Bindungsstärke aufweisen und die Grundhärte bedingen. Die kubisch-flächenzentrierte Mischkristallstruktur der Bindemittelphase führt zu einem höheren Anteil kovalenter Komponenten und reguliert so das gesamte Bindungsnetzwerk. Der Kern dieser Beziehung liegt in der Mischung der Bindungen an der Grenzfläche. Die Bindung von Wolframatomen mit Nickel oder Eisen bildet eine Übergangszone mit einem Gradienten der Bindungsstärkeverteilung, der zur Abfederung externer Belastungen beiträgt.

Die Erhöhung der chemischen Bindungsstärke wird häufig durch Mischkristallverfestigung erreicht. Legierungselemente lösen sich im Kristallgitter auf, verursachen Verzerrungen und erhöhen den Widerstand gegen Versetzungsbewegungen, wodurch die Härte verbessert wird. In der Wolframphase hängt die Bindungsstärke von der Reinheit ab; in einem hochreinen Zustand sind die metallischen Bindungen gleichmäßig verteilt, was zu einer stabilen Härte führt. Die Einbringung von Verunreinigungen schwächt die Bindungen und bildet lokal weiche Bereiche. In der Binderphase erhöht die Vermischung von Nickel und Eisen die Bindungsstärke, und Eisenatome passen die Elektronendichte an, wodurch die Bindungsstabilität gefördert wird. Der Sinterprozess beeinflusst dieses Verhältnis; in der flüssigen Phase findet Bindungsrekombination statt, und Ausscheidungen verstärken das Bindungsnetzwerk während der Abkühlung zusätzlich, was zu Härteänderungen führt. Walzverformung induziert Bindungsspannungen, reichert Versetzungen chemisch mit umgebenden Elementen an und erhöht so die lokale Härte, erfordert jedoch ein Glühen zum Erreichen des Gleichgewichts.

Der Zusammenhang erstreckt sich auch auf die Temperaturabhängigkeit: Bei hohen Temperaturen nehmen die Bindungsschwingungen zu, was zu einer Abnahme der Härte führt. Die Bindungsstärke der Wolframphase bleibt jedoch relativ stabil, was Anwendungen in thermischen Umgebungen ermöglicht. Die chemische Bindungsstärke an der Oberfläche beeinflusst die Härteprüfung; Oxidschichten bilden schwache Bindungen, die durch Schutzbeschichtungen wiederhergestellt werden müssen. Die Zugabe von Verunreinigungen wie Kohlenstoff kann zur Bildung von Carbidbindungen führen, die zwar stark sind, aber eine gleichmäßige Verteilung erfordern, um Versprödung zu vermeiden. Unter dem Einfluss von Umweltfaktoren fördert Feuchtigkeit die Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen, wodurch Oberflächenbindungen geschwächt und die Härte indirekt reduziert wird.

#### 4.3.2 Mechanismus der chemischen Korrosionsbeständigkeit von Wolframlegierungsblechen

Die Verschleißfestigkeit von Wolframlegierungsblechen beruht primär auf dem Verbunddesign der Materialstruktur und dem Zusammenspiel chemischer Oberflächenreaktionen. Dieser Mechanismus trägt dazu bei, dass das Material seine Integrität unter Reibung und Einwirkung von Medien bewahrt. Die Verschleißfestigkeit, eine mechanische Eigenschaft, beruht auf einem ausgewogenen Verhältnis zwischen Oberflächenhärte und Zähigkeit, während die chemische Korrosionsbeständigkeit die Erosion durch Passivierungsschichten und das elektrochemische Verhalten der Elemente hemmt; beide Faktoren interagieren und bilden ein Schutzsystem. In Wolframlegierungsblechen bildet die Wolframphase das verschleißfeste Gerüst, die Bindemittelphase moduliert die chemische Aktivität, und die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elementverteilung an der Grenzfläche optimiert den Widerstandsmechanismus. Der Kern des Mechanismus liegt in der chemischen Umwandlung während der Reibung; Oberflächenatome ordnen sich unter Belastung neu an und bilden eine Oxidschicht oder einen Adsorptionsfilm, wodurch die Verschleißrate reduziert wird.

Korrosionsbeständigkeit wird durch elektrochemische Passivierung erreicht, wobei Nickel oder Kupfer die Bildung eines stabilen Oxidfilms auf der Oberfläche fördert und so das Eindringen von Medien verhindert. Die mechanische Haftung des Films hängt von der Bindungsstärke ab. In Verschleißumgebungen beruht der Mechanismus auf der Kopplung von oxidativem und korrosivem Verschleiß; chemische Reaktionen erzeugen Schutzprodukte, die den Reibungskoeffizienten mechanisch reduzieren. Sinterprozesse formen die Struktur, wobei die flüssige Phase ein gleichmäßiges Mikrogefüge fördert und korrosionsanfällige Bereiche verringert. Die Oberflächentextur nach dem Walzen beeinflusst den Mechanismus; die chemische Glättung der Oberfläche reduziert die Medienhaftung und verteilt die Spannung mechanisch gleichmäßig. Zu den Störmechanismen durch Verunreinigungen gehören Phosphor- und Schwefelanreicherungen, die lokale Korrosion verursachen und daher eine Reinigung und Kontrolle erfordern.

Der Mechanismus zeigt eine deutliche Temperaturabhängigkeit; die Oxidation beschleunigt sich bei hohen Temperaturen, die Stabilität der Wolframphase bleibt jedoch erhalten. Beschichtungsverfahren verstärken den Mechanismus; die stromlose Vernickelung bildet eine zusätzliche Barriere und verbessert die Verschleißfestigkeit. Umwelteinflüsse wie Säuren und Laugen verändern den Mechanismus, und die Anpassungsfähigkeit des Passivierungsfilms bestimmt die Langzeitleistung.

#### **4.3.3 Der Einfluss der chemischen Oberflächenbarriere von Wolframlegierungsblechen auf die Korrosionsbeständigkeit**

Die Korrosionsbeständigkeit von Wolframlegierungsblechen beruht primär auf der Bildung von Oxidschichten und Adsorptionsschichten. Diese Schichten gewährleisten die Materialstabilität, indem sie den Kontakt zwischen Medium und Substrat verhindern. Die Korrosionsbeständigkeit als chemische Eigenschaft resultiert aus dem elektrochemischen Verhalten der Oberflächenelemente, während die Barrierewirkung durch den Aufbau einer Mehrschichtstruktur erzielt wird. Mechanisch muss die Schicht haften, um ein Ablösen zu verhindern. Bei Wolframlegierungsblechen oxidiert die Wolframphasenoberfläche leicht zu einer  $WO_3$ -Schicht. Bindemittel wie Nickel fördern jedoch die Bildung eines Kompositfilms und verstärken so die Barrierewirkung. Das zugrundeliegende Prinzip ist die thermodynamische Stabilität und die niedrige freie Energie des Films, wodurch weitere Reaktionen gehemmt werden.

Die Barrierewirkung wird durch Selbstpassivierung erzielt; der Film heilt sich nach anfänglicher Oxidation selbst und besteht chemisch aus Nickel- oder Kupferoxid. Die Flexibilität des Films verhindert mechanisch Rissbildung. Der Oberflächenzustand nach dem Sintern beeinflusst die Barriereeigenschaften; eine saubere Oberfläche fördert eine gleichmäßige Filmbildung. Die Oberflächenrauheit beim Walzen bestimmt die Wirksamkeit der Barriere, und chemisch gesehen erhöhen

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

Mikrostrukturen die Haftpunkte. Der anfängliche Gehalt an Verunreinigungen, wie z. B. Sauerstoff, bestimmt die Qualität der Barriere; ein Sauerstoffüberschuss führt zu einem porösen Film. Unter verschiedenen Umgebungsbedingungen passt sich die Barriere an unterschiedliche Medien an; unter sauren Bedingungen löst sich der Film auf und bildet sich neu. Darüber hinaus beeinflusst die Temperatur die Barriereigenschaften maßgeblich; hohe Temperaturen beschleunigen die Diffusion, erhalten aber die Stabilität und Barrierefunktion des Verbundfilms. Beschichtungstechnologien verlängern die Wirksamkeit der Barriere; die Vakuumverchromung bildet eine zusätzliche Schicht und erhöht so die Gesamtbeständigkeit.

#### **4.4 Analyse des Zusammenhangs zwischen Prozess, Struktur und Leistung von Wolframlegierungsblechen**

Die Analyse des Zusammenhangs zwischen Prozess, Struktur und Leistung von Wolframlegierungsblechen konzentriert sich auf die logische Kette von der Herstellung bis zur finalen Leistung. Diese Analyse trägt zum Verständnis bei, wie Prozessparameter die Mikrostruktur und damit das makroskopische Verhalten beeinflussen. Prozessschritte wie Sintern, Walzen und Oberflächenbehandlung wirken jeweils auf unterschiedlichen Skalen: Sintern legt die Ausgangsstruktur fest, Walzen optimiert die Verformung weiter, und die Oberflächenbehandlung zielt auf die chemische Grenzfläche ab. Die Struktur, die als Vermittler fungiert, umfasst die Kornverteilung, die Phasengrenzflächenbindung und Defektzustände; diese Elemente sind über chemische Bindungen und Elementdiffusion mit der Leistung verknüpft. Die Leistung umfasst mechanische, thermische und chemische Aspekte; beispielsweise resultiert die Härte aus der Gitterfestigkeit, und die Korrosionsbeständigkeit hängt von Oberflächenbarrieren ab. Der Zusammenhang manifestiert sich als mehrstufiger Prozess: Prozesse verändern die atomare Anordnung, die Struktur passt das Bindungsnetzwerk an, und die Leistung reagiert entsprechend. Der analytische Rahmen betont Rückkopplungsschleifen; Ergebnisse von Leistungstests dienen als Grundlage für Prozessanpassungen und gewährleisten so die Eignung des Materials für industrielle Anwendungen. Durch diese Analyse wird die Entwicklung von Wolframlegierungsblechen systematischer und unterstützt deren Einsatz in Präzisionsanwendungen. In der praktischen Analyse berücksichtigt die Korrelation auch das Gleichgewicht von Thermodynamik und Kinetik. Die Prozesstemperatur beeinflusst die Diffusionsrate, und die Strukturstabilität bestimmt die Leistungsdauer. Elementverhältnisse spielen eine Brückenfunktion in der Korrelation; ein hoher Wolframgehalt führt zu einer dichten Struktur und einer auf hohe Dichte ausgerichteten Leistung, erfordert jedoch eine Prozesskompensation der Plastizität. Umweltfaktoren werden in die Analyse einbezogen; Änderungen der Luftfeuchtigkeit oder Temperatur testen die Robustheit der Korrelation. Die Verunreinigungskontrolle wird während des gesamten Prozesses aufrechterhalten, und die chemische Reinigung verhindert, dass die Verstärkung von Defekten die Leistung beeinträchtigt.

##### **4.4.1 Der Einfluss des Sinterprozesses auf das Mikrogefüge von Wolframlegierungsblechen**

Der Sinterprozess reguliert die Mikrostruktur von Wolframlegierungsblechen primär durch Parameter wie Temperatur, Atmosphäre und Zeit. Dadurch werden Phasenbildung, Partikelentwicklung und

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

Grenzflächenbindung gesteuert. Diese Steuerung bildet die Grundlage für die nachfolgende Materialverarbeitung und -leistung. Während des Sinterns durchläuft das Pulvergemisch einen Übergang von der Festphasendiffusion zur Flüssigphasenbildung. Die Wolframpartikel ordnen sich unter Benetzung mit der Bindemittelphase neu an und bilden eine gleichmäßig verteilte Zweiphasenstruktur. Die Temperaturkontrolle ist entscheidend: Hohe Temperaturen fördern die Flüssigphasenbildung, und Bindemittel wie Nickel oder Kupfer schmelzen und umschließen die Wolframpartikel. Dies reduziert chemisch die Oberflächenenergie und fördert die Sphäroidisierung der Partikel. Niedrigere Temperaturen werden für das Festphasensintern verwendet, um einen Überschuss an Flüssigphase und damit eine poröse Struktur zu vermeiden. Auch die Atmosphäre beeinflusst die Steuerung: Wasserstoff reduziert Oxide und sorgt für eine saubere Grenzfläche, während Stickstoff oder Vakuum die durch Restgase verursachte Porosität unterdrücken. Die Zeitparameter gewährleisten eine ausreichende Diffusion. Eine verlängerte Haltezeit begünstigt die begrenzte Auflösung von Wolframatomen in der Bindemittelphase, und die anschließende Abkühlung führt zur Ausfällung feiner Phasen, wodurch die Struktur verstärkt wird.

Der regulierende Effekt zeigt sich auch in der Anpassung der Korngröße. Schnelles Erhitzen erhält feine Partikel, während ein langsamer Prozess das Wachstum ermöglicht. Der chemische Mechanismus beruht auf der Ostwald-Reifung, bei der größere Partikel kleinere umschließen und so eine einheitliche Größe erreichen. Die Phasenverteilung wird durch die Zusammensetzung gesteuert; mit zunehmendem Anteil der Binderphase nähert sich die Struktur einem kontinuierlichen Netzwerk an, wodurch die Kohärenz verbessert wird. Während des Sinterns bildet sich allmählich eine Grenzflächenchemie aus, es entstehen Bereiche mit Elementgradienten, und die Interdiffusion von Wolfram und Nickel erzeugt eine Übergangsschicht, die die Bindung verstärkt. Die Kontrolle von Defekten steht im Vordergrund; die Porosität wird durch Flüssigphasenfüllung reduziert, Versetzungen erholen sich bei hohen Temperaturen, und chemische Verunreinigungen verflüchtigen sich und werden ausgestoßen, wodurch eine Agglomeration verhindert wird. Die Sinterstruktur bildet die Grundlage für das Walzen; das gleichmäßige Mikrogefüge ermöglicht eine rissfreie Verformung.

Darüber hinaus erstreckt sich die regulierende Wirkung auch auf die Wärmebehandlung. Das Nachglühen nach dem Sintern homogenisiert die Struktur weiter, verteilt und justiert die Positionen der Elemente und optimiert die Korngrenzenzusammensetzung. Durch die Kombination von Prozessparametern ist eine gezielte Steuerung möglich; beispielsweise werden bei der Erzielung einer feinkörnigen Struktur niedrigere Temperaturen und längere Haltezeiten eingesetzt, um die Korngrenzenwanderung chemisch zu hemmen. Die Reinheit der Atmosphäre beeinflusst die regulierende Wirkung; eine hochreine Umgebung reduziert Oxideinschlüsse und erhält die strukturelle Integrität. Die Behandlung von Verunreinigungen zeigt sich im Sinterprozess: Phosphor und Schwefel werden durch Verflüchtigung entfernt, und geringe Restmengen führen zu struktureller Stabilität. Im Hinblick auf die Anpassungsfähigkeit an Umwelteinflüsse gewährleistet diese Steuerung, dass die Struktur bei Temperaturänderungen relativ stabil bleibt und sich somit für Anwendungen mit Temperaturwechselbeanspruchung eignet.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



#### 4.4.2 Einflussmechanismus des Walzprozesses auf die mechanischen Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen

Der Walzprozess beeinflusst die mechanischen Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen primär durch verformungsinduzierte Strukturänderungen und reguliert so Festigkeit, Zähigkeit und Härte. Dieser Mechanismus beinhaltet Wechselwirkungen auf mehreren Ebenen, darunter Versetzungsansammlung, Kornfeinung und Phasengrenzflächenkoordination. Beim Walzen, ob warm oder kalt, trägt die Wolframphase die Hauptspannung, während die Binderphase den Verformungsfluss unterstützt. Dies führt zu einer Rekonstruktion des chemischen Bindungsnetzwerks, einer erhöhten Versetzungsdichte und einer verbesserten Streckgrenze. Warmwalzen bewirkt aufgrund der höheren Temperatur eine dynamische Erholung, bei der Diffusion die Heilung von Kristallfehlern fördert und Sprödigkeit verhindert. Kaltwalzen führt zu einer stärkeren Kaltverfestigung durch Aktivierung von Gleitsystemen, Streckung der Wolframpartikel in Walzrichtung, Ausbildung einer faserigen Textur und verbesserte Zugeigenschaften.

Der Einflussmechanismus spiegelt sich auch in der Zähigkeitsanpassung wider. Mehrfaches Walzen mit Zwischenglühen ermöglicht die chemische Diffusion, um die Spannungsverteilung anzupassen und die durch Eigenspannungen verursachte Rissbildung zu reduzieren. Der Reduktionskontrollmechanismus ist entscheidend: Hohe Reduktionen induzieren Rekristallisationskeime, verfeinern das Korn und verbessern das Verhältnis von Festigkeit zu Zähigkeit. Im Grenzflächenmechanismus wirkt die Binderphase als Pufferschicht, die Verformungsenergie absorbiert, und die chemische Bindungsstärke bestimmt die Koordinationseffizienz. Auch die Defektentwicklung ist ein Bestandteil des Mechanismus: Walzen erzeugt Versetzungswände, und chemisch stabilisieren Elementsegregation und -verankerung die Struktur. Oberflächeneffekte wirken sich ebenfalls auf den Mechanismus aus: Die Walzoberfläche beeinflusst die Dauerfestigkeit und reduziert chemisch die Oxidationsinitiierungspunkte.

Weiterführende Analysen zeigen eine signifikante Temperaturabhängigkeit des Mechanismus, der die Vorteile des Warmwalzens mit denen des Heißwalzens vereint. Der Mechanismus weist sowohl Erholung als auch Verfestigung auf und optimiert so die mechanischen Eigenschaften. Prozessparameter wie die Walzgeschwindigkeit beeinflussen den Mechanismus, wodurch die Erholungszeit deutlich verkürzt und die Härte erhöht wird. Verunreinigungen stören den Mechanismus; Sauerstoff und andere Elemente verursachen Risse, weshalb eine vorherige Reinigung erforderlich ist, um diese Effekte zu minimieren.

#### 4.4.3 Optimierungspfad der Oberflächenbehandlung zur Verbesserung der chemischen Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen

Die Oberflächenbehandlung optimiert die chemischen Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen vor allem durch Verfahren wie Galvanisieren, Oxidieren oder chemische Modifizieren, um eine Schutzschicht zu erzeugen. Dadurch werden chemische Eigenschaften wie Korrosionsbeständigkeit, Oxidationsbeständigkeit und Affinität verbessert. Der Prozess umfasst die Oberflächenreinigung, gefolgt von der Filmbeschichtung, wodurch eine neue chemische Phasenschicht entsteht, die das Eindringen von

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Medien verhindert. Galvanisieren ist ein gängiges Verfahren, bei dem Nickel- oder Goldschichten elektrochemisch abgeschieden werden. Durch Ionenreduktion wird die Bildung eines dichten Films optimiert, wobei die Haftung von der Diffusion der Matrixelemente abhängt. Vakuumgalvanisieren wird in Hochtemperaturumgebungen eingesetzt. Hierbei bildet die verdampfende Aluminiumabscheidung eine Aluminiumoxidbarriere, die zu hoher chemischer Stabilität führt. Chemisches Polieren entfernt Oberflächenfehler; unter sauren Bedingungen wird die Wolframphase leicht angelöst, wodurch die Grenzfläche geglättet und die chemische Inertheit verbessert wird.

Der Optimierungsprozess umfasst auch Kompositbehandlungen, thermische Diffusion nach der Beschichtung, verbesserte chemische Bindung und die Durchdringung von Elementen entlang des Prozesses zur Bildung von Gradientenbereichen und damit zur Verbesserung der Haftung. Die Ionenimplantation führt Stickstoff oder Kohlenstoff ein, härtet die Oberfläche und optimiert gleichzeitig die chemische Zusammensetzung. Dabei werden Atome in das Kristallgitter eingebettet, was die elektronische Struktur verändert und den dielektrischen Widerstand verbessert. Die anodische Oxidation erzeugt einen Oxidfilm. Unter elektrolytischen Bedingungen bildet sich selbstständig eine Wolframoxidschicht. Die Schichtdicke wird durch Spannungssteuerung angepasst, und die chemisch passivierende Schicht passiviert das Substrat. Eine gründliche Vorbehandlung ist für den Prozess unerlässlich. Ultraschall- oder Plasmabehandlung entfernt Verunreinigungen und gewährleistet so eine gleichmäßige Haftung.

Darüber hinaus ist die Temperaturkontrolle im Beschichtungsprozess entscheidend: Eine Behandlung bei niedrigen Temperaturen erhält die Substratstruktur, während die Diffusion bei hohen Temperaturen die Grenzfläche optimiert. Verunreinigungen beeinträchtigen den Beschichtungsprozess, und Oberflächenrückstände stören die Filmbildung, was eine mehrstufige Reinigung erforderlich macht. Umweltverträgliche Beschichtungsverfahren beinhalten die Auswahl spezifischer Beschichtungen für saure und alkalische Medien, wobei die chemische Beständigkeit die Wirksamkeit bestimmt. Eine Nachbehandlung durch Tempern stabilisiert die Filmschicht zusätzlich, gewährleistet eine gleichmäßige Diffusion und verbessert die Langzeitbeständigkeit gegenüber chemischen Substanzen.

#### **4.5 Struktur- und Leistungsverhalten von Wolframlegierungsblechen unter speziellen Umgebungsbedingungen**

Wolframlegierungsbleche zeigen unter speziellen Umgebungsbedingungen primär die Anpassung des Materials an die äußeren Gegebenheiten. Diese Reaktion umfasst die Entwicklung der Mikrostruktur und die Anpassung des makroskopischen Verhaltens und trägt zum Verständnis bei, wie Materialien ihre Funktion unter Bedingungen wie hohen Temperaturen, Strahlung oder Druck aufrechterhalten. Strukturelle Reaktionen beinhalten Komveränderungen, Wechselwirkungen zwischen den Phasen und Defektdynamik, während sich Leistungsreaktionen in mechanischen, thermischen und chemischen Aspekten widerspiegeln, wie z. B. thermischer Stabilität bei hohen Temperaturen, chemischer Beständigkeit unter Strahlung und mechanischer Entwicklung unter Druck. Der Reaktionsmechanismus beruht auf dem Gleichgewicht zwischen der Elastizität chemischer Bindungen und der Phasenstruktur; die Wolframphase bildet das Gerüst, während die Binderphase als Puffer dient. Die Überlagerung von

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

Umwelteinflüssen verkompliziert die Reaktion; erhöhte Temperatur kann Diffusion induzieren, Strahlung beeinflusst die elektronische Struktur und Druck verändert den interatomaren Abstand. Korrelationsanalysen betonen eine multiskalige Perspektive, von der Rekonstruktion atomarer Bindungen bis hin zur makroskopischen Leistungsverlechterung. Prozessvorbehandlungen wie die Legierungsoptimierung können die Reaktionsfähigkeit verbessern, und die Anpassung des Elementverhältnisses trägt zur allmählichen Stabilisierung der Struktur in der jeweiligen Umgebung bei.

In der Praxis bildet die Wechselwirkung zwischen Struktur und Leistung einen Rückkopplungsmechanismus. Die Ausgangsstruktur bestimmt den Ausgangspunkt der Reaktion, während die weitere Entwicklung die Leistungsbeständigkeit beeinflusst. Die Rolle von Verunreinigungen muss berücksichtigt werden; Sauerstoff beispielsweise kann negative Veränderungen der Reaktion beschleunigen, was durch Reinigung gemildert werden kann. Bei allmählichen Änderungen des Temperaturgradienten oder der Strahlungs dosis zeigt die Reaktion ein nichtlineares Verhalten: Sie stabilisiert sich zunächst und beschleunigt sich später. Druckreaktionen beinhalten eine Volumenkompression, und die Kompression chemischer Bindungen erhöht die Festigkeit.

#### 4.5.1 Veränderungen der Strukturstabilität von Wolframlegierungsblechen unter Hochtemperaturbedingungen

Die Veränderungen von Wolframlegierungsblechen bei hohen Temperaturen beruhen hauptsächlich auf thermisch aktivierten Diffusionsprozessen und der Koordination der thermischen Ausdehnung zwischen den Phasen. Diese Veränderungen beeinträchtigen die Gesamtintegrität und die funktionelle Kontinuität des Materials. Bei hohen Temperaturen bleibt das kubisch-raumzentrierte Gitter der Wolframphase relativ stabil, jedoch beginnt in der festen Lösung der Binderphase eine Atommigration. Wolframatome lösen sich von den Partikelrändern in die Binderphase und bilden einen übersättigten Zustand. Mit steigender Temperatur verstärkt sich diese Auflösung, wodurch sich die Oberflächenkrümmung der Partikel verändert. Dies führt zu einer allmählichen Schrumpfung kleiner Partikel und einer leichten Vergrößerung großer Partikel, was eine Vergrößerung der Struktur zur Folge hat. Der Mechanismus beinhaltet Grenzflächenchemie: Thermische Energie treibt die Elementdiffusion an, wobei Nickel- oder Kupferatome in die Wolframphase eindringen und dünne Mischkristallzonen bilden. Diese regulieren die Spannungsverteilung und verhindern die Grenzflächentrennung. Beim Abkühlen scheidet sich übersättigtes Wolfram in Form feiner Phasen ab, die Korngrenzen fixieren und die ursprüngliche Struktur teilweise wiederherstellen. Wiederholte Temperaturzyklen können jedoch zu Restveränderungen führen.

Strukturelle Veränderungen spiegeln sich auch in der Defektdynamik wider. Bei hohen Temperaturen ist das Versetzungsklettern aktiv, die Leerstellenkonzentration steigt, und chemische Verunreinigungen wie Sauerstoff reichern sich an den Korngrenzen an und bilden Verbindungsschichten, die die Migrationsraten beeinflussen. Die Phasenverteilung ändert sich allmählich; die Binderphase kann sich leicht ausdehnen, aber der niedrige Ausdehnungskoeffizient der Wolframphase dämpft die Gesamtverformung. Das Ausmaß der Veränderung hängt von der Dauer der Umwelteinwirkung ab; kurze Einwirkung führt zu einer besseren Strukturherholung, während lange Einwirkung zur Bildung von Rekristallisationskeimen führen kann, wodurch neue Körner entstehen und die Stabilität optimiert wird.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chemische Bindungen werden während dieser Veränderungen rekonstruiert; metallische Bindungen erhalten die Festigkeit in der Wolframphase, während kovalente Komponenten die Hitzebeständigkeit an der Grenzfläche erhöhen. Durch Glühen können diese Veränderungen gesteuert werden; die Kontrolle der Abkühlgeschwindigkeit fixiert eine günstige Struktur und verhindert übermäßiges Kornwachstum.

Weitere Analysen zeigen, dass die sich ändernde Temperaturschwelle vom Legierungssystem abhängt. Das Nickel-Eisen-System weist bei höheren Temperaturen eine fortschreitende Kornvergrößerung auf, während das Nickel-Kupfer-System aufgrund der Wärmeleitfähigkeit von Kupfer gleichmäßig reagiert. Die Kontrolle von Verunreinigungen beeinflusst die Veränderungen; Elemente wie Phosphor führen zu lokaler Erweichung und erfordern daher eine vorherige Reinigung. Bei Vorhandensein von Luftfeuchtigkeit kann Feuchtigkeit die Oberflächenoxidation fördern, wodurch sich die Strukturveränderungen von außen nach innen ausbreiten und Gradientenbereiche bilden. Das mechanische Verhalten korreliert mit den Strukturveränderungen; unter Hochtemperaturkriechbeanspruchung gleiten die Partikel, und die Binderphase verformt sich koordiniert. In Umgebungen mit Temperaturwechseln deuten die Veränderungen auf eine Akkumulation von Ermüdungserscheinungen hin, und die Schwächung der Korngrenzen muss durch Dotierung verringert werden.

#### 4.5.2 Chemische Beständigkeit von Wolframlegierungsblechen unter Strahlungsbedingungen

Die Beständigkeit von Wolframlegierungsblechen unter Strahlungseinwirkung beruht primär auf der Reaktion der Verbundmikrostruktur des Materials auf die Energiezufuhr. Diese Beständigkeit trägt dazu bei, dass das Material die Integrität seines chemischen Bindungsnetzwerks und seiner Phasenstruktur unter dem Einfluss von Strahlung oder Teilchen bewahrt. Bei Beschuss mit Strahlung wie Röntgenstrahlen oder Elektronenstrahlen absorbiert die hohe Ordnungszahl der Wolframphase Energie, was zu kaskadenartigen Verschiebungen führt. Chemisch gesehen brechen atomare Bindungen kurzzeitig und bilden sich anschließend neu, wodurch Punktdefektcluster entstehen. Der Mechanismus der strukturellen Beständigkeit beinhaltet Anpassungen der elektronischen Struktur: Strahlung induziert elektronische Anregungen, wodurch Außenelektronen der Wolframatomkerne aus ihren Schalen springen. Diese relaxieren jedoch schnell und kehren ins Gleichgewicht zurück. Die feste Lösung der Bindemittelphase puffert den Aufprall, und die gleichmäßige Verteilung von Nickel- oder Kupferatomen verteilt die Energie und verhindert so lokale Schäden. Die Grenzflächenchemie spielt ebenfalls eine Rolle für die Beständigkeit: Die Durchdringung von Elementen in Gradientenbereichen erhöht die Bindungsstärke, und strahlungsbedingt verschobene Atome regenerieren sich selbst.

Die Toleranz spiegelt sich auch in der Defektentwicklung wider: Strahlung erzeugt Leerstellen-Zwischengitteratom-Paare, chemische Diffusion fördert die Rekombination und reduziert die Akkumulation. Die Phasenverteilung bleibt stabil; Wolframpartikel schirmen die Binderphase ab und verringern so den Strahlungsfluss. Die Dosisabhängigkeit dieser Veränderungen ist signifikant: Niedrige Dosen führen zu einer Feinabstimmung der Struktur, während hohe Dosen ein Aufquellen mit geringfügigen Volumenänderungen hervorrufen können, die durch Dotierung abgemildert werden. Der chemische Zustand reagiert auf Strahlung; es können sich Oxidschichten bilden, und die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Oberflächenpassivierung erhöht die Toleranz. Tempern trägt zusätzlich zur Toleranz bei; die thermische Energie treibt die Defektmigration an und stellt die Gitterordnung wieder her.

Die Legierungssysteme weisen deutliche Unterschiede in ihrer Beständigkeit auf. Das Nickel-Eisen-System zeigt unter Magnetfeldstrahlung ein koordiniertes Verhalten, während das Nickel-Kupfer-System die Energie aufgrund seiner Leitfähigkeit gleichmäßig verteilt. Verunreinigungen beeinflussen die Beständigkeit; Sauerstoff und andere Elemente binden Strahlungsprodukte und bilden Verbindungen, die gereinigt und kontrolliert werden müssen. Unter Umgebungsbedingungen wie Strahlungserwärmung zeigt die Beständigkeit Synergieeffekte, wobei die thermische Diffusion die Defektheilung beschleunigt. In Bezug auf die mechanischen Eigenschaften verbessert die Strahlungshärtung die Festigkeit, jedoch müssen Änderungen der Zähigkeit überwacht werden. Bei Langzeitbestrahlung verändert sich die Beständigkeit allmählich, wobei sich die Struktur an das Strahlungsfeld anpasst und eine kontinuierliche Funktion gewährleistet.

#### 4.5.3 Leistungsentwicklung von Wolframlegierungsblechen unter extremem Druck

Das Verhalten von Wolframlegierungsblechen unter extremem Druck beruht hauptsächlich auf der Kompressionsreaktion der Struktur und der dynamischen Koordination der Phasengrenzen. Dieser dynamische Prozess beeinflusst das mechanische Verhalten und die chemische Stabilität des Materials und trägt zum Verständnis des Anpassungsmechanismus unter hohem Druck bei. Bei Druckeinwirkung wird das Gitter der Wolframphase komprimiert, der Atomabstand verringert sich, die chemische Bindungsstärke erhöht sich und die Härte steigt. Diese Entwicklung beinhaltet Volumenänderungen und eine Gesamtschrumpfung des Materials. Die Duktilität der Binderphase puffert jedoch die Sprödigkeitstendenz der Wolframphase und verhindert so deren Fragmentierung. In diesem Mechanismus ist die Versetzungsbewegung aktiv, das Gleitsystem wird unter hohem Druck aktiviert, die chemische Elementverteilung wird angepasst und Spannungskonzentrationen werden abgebaut. Die Grenzfläche spielt eine entscheidende Rolle; die Deformationskoordination im Gradientenbereich verhindert eine Trennung.

Die Leistungsentwicklung spiegelt sich auch im Verhältnis zwischen Zähigkeit und Festigkeit wider: Die Festigkeit steigt zunächst an, die Zähigkeit nimmt allmählich ab, und nach Druckentlastung erfolgt eine teilweise Erholung. Die Defektdynamik zeigt sich systematisch: Leerstellenkompression reduziert die Festigkeit, Versetzungswände bilden sich, und chemische Diffusion fördert die Stabilisierung. Die Phasenverteilung reagiert auf den Druck; Wolframpartikel sind dichter gepackt, und die Binderphase füllt die Zwischenräume, wodurch die Kohärenz optimiert wird. Die Druckschwelle für die Entwicklung ist systemabhängig; Nickel-Eisen-Systeme zeigen eine progressive Aushärtung, während Nickel-Kupfer-Systeme aufgrund der Wärmeleitfähigkeit gleichmäßig reagieren. Eine Hochdruckbehandlung nach dem Glühen kann die Entwicklung regulieren und das strukturelle Gleichgewicht wiederherstellen.

Der Effekt der regelmäßigen Temperaturüberlagerung ist signifikant; die Diffusion wird unter Hochdruckerhitzung verstärkt und die Entwicklung beschleunigt, was jedoch durch Kühlung kontrolliert werden kann. Verunreinigungen stören die Regelmäßigkeit; Phosphor und andere Elemente führen zu

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

lokalen Schwachstellen, die durch Reinigung behoben werden müssen. Umwelteinflüsse wie Druckzyklen verursachen Ermüdung während der Entwicklung, und allmähliche Strukturänderungen erfordern eine Optimierung der Dotierung. Hinsichtlich der chemischen Eigenschaften verbessert die Bindungskompression unter Hochdruck die Korrosionsbeständigkeit und verdichtet die Oberflächenbarriere. Unter langfristigem Hochdruck spiegelt die Entwicklung eine Anpassung wider, und die Leistung stabilisiert sich tendenziell, sodass kontinuierliche Belastungen möglich sind.

#### 4.6 CTIA GROUP LTD Sicherheitsdatenblatt für Wolframlegierungsblech

CTIA GROUP LTD Das Sicherheitsdatenblatt für Wolframlegierungsbleche basiert auf Normen wie GB/T 16483-2008 „Inhalt und Reihenfolge der Angaben in Sicherheitsdatenblättern für Chemikalien“. Es beschreibt detailliert die physikalisch-chemischen Eigenschaften, die Gefahrenidentifizierung und die Notfallmaßnahmen in Kombination mit den spezifischen Bestandteilen des Produkts, wie beispielsweise dem Anteil an Wolfram, Nickel, Eisen oder Kupfer.

Wolframlegierungen enthalten Wolfram als Hauptbestandteil, das die Grundlage für hohe Dichte und Härte bildet. Ergänzt wird Wolfram durch Nickel, Eisen oder Kupfer als Bindemittel, wobei die Anteile je nach Legierungsreihe angepasst werden. Im System Wolfram-Nickel-Eisen beispielsweise sorgt das Nickel-Eisen-Verhältnis für ein ausgewogenes Verhältnis von Benetzung und Festigkeit. Spurenelemente wie Kohlenstoff und Sauerstoff werden auf niedrige Konzentrationen gehalten, um die Bildung von Versprödungsphasen zu vermeiden. Chemisch werden die Elemente in diesem Teil mit CAS-Nummern identifiziert: Wolfram CAS 7440-33-7, Nickel CAS 7440-02-0. Zu den beschriebenen Verunreinigungen zählen potenzielle Schadstoffe wie Phosphor und Schwefel, die aus den Rohstoffen stammen. Daher werden Reinigungsverfahren zur Reduzierung ihres Gehalts hervorgehoben.

Die Zusammensetzungsinformationen umfassen auch eine Beschreibung der Legierungsphasenstruktur. Im Zweiphasen-Verbundwerkstoff sind die Wolframpartikel kubisch-raumzentriert, die Bindemittelphase hingegen eine kubisch-flächenzentrierte Mischkristallphase. Das Material ist chemisch stabil und enthält keine flüchtigen Bestandteile. Löslichkeitsanalysen zeigen, dass es in Wasser unlöslich ist.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsbleche

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

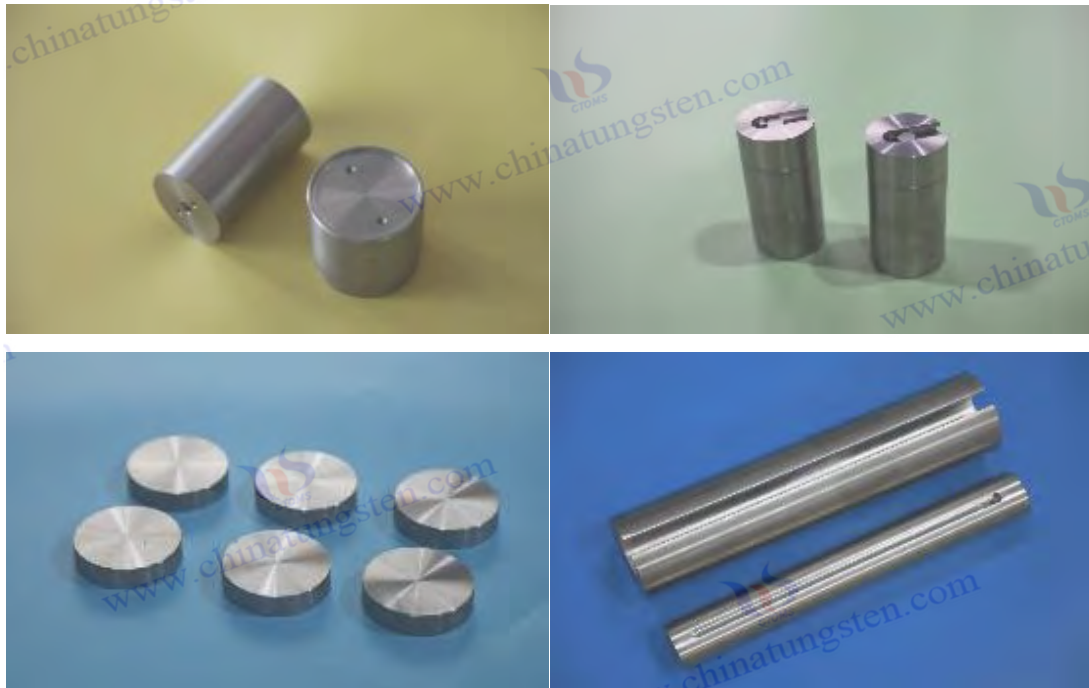
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

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



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Kapitel 5 Leistungsprüfung und Charakterisierungsverfahren für Wolframlegierungsbleche

### 5.1 Analyseverfahren zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Wolframlegierungsblechen

Wolframlegierungsbleche werden primär aufgrund ihrer Mehrkomponenten-Zusammensetzung untersucht. Spektroskopische, Fluoreszenz- und nasschemische Methoden ermöglichen die qualitative und quantitative Bestimmung von Hauptelementen wie Wolfram, Nickel, Eisen und Kupfer sowie von Spurenverunreinigungen. Diese Techniken spielen eine wichtige Rolle in der Materialqualitätskontrolle und tragen zur Überprüfung von Legierungsanteil, Reinheit und Homogenität bei. Atomabsorptions- und Emissionsspektroskopie eignen sich zur Elementbestimmung gelöster Proben, Röntgenfluoreszenzspektroskopie ermöglicht eine zerstörungsfreie und schnelle Analyse, und die chemische Titration wird für spezifische Spurenelemente eingesetzt. Die Probenvorbereitung vor der Analyse umfasst Schneiden, Auflösen oder Oberflächenreinigung. Zum Auflösen wird üblicherweise ein Gemisch aus Salpetersäure und Fluorwasserstoffsäure verwendet, um die schwerlösliche Wolframphase zu behandeln. Die Wahl der Methode hängt von der Art und dem Gehalt des Elements ab; Fluoreszenzmethoden eignen sich für Hauptelemente wie Wolfram mit hohem Anteil, während hochempfindliche spektroskopische Methoden für Spurenelemente erforderlich sind. Die Analyseergebnisse dienen der Prozessoptimierung und gewährleisten die Zuverlässigkeit der Materialien in industriellen Anwendungen.

Diese Techniken berücksichtigen auch Matrixeffekte; die hohe Dichte der Wolframmatrix kann das Signal stören, was durch Kalibrierung mit Standardproben minimiert wird. Zerstörungsfreie Methoden wie die Fluoreszenzspektroskopie ermöglichen die Online-Detektion, während destruktive Methoden wie die Absorptionsspektroskopie eine höhere Präzision bieten. Die Verunreinigungsanalyse konzentriert sich auf Sauerstoff, Kohlenstoff, Phosphor usw., die die Gewebestabilität beeinflussen. Verschiedene Techniken lassen sich zu einem Gesamtsystem kombinieren, beispielsweise Fluoreszenz-Screening gefolgt von einer präzisen Spektralanalyse. Aufgrund von Umwelteinflüssen muss die Analyse in einem Reinraumlabor durchgeführt werden, um Kontaminationen zu vermeiden.

#### 5.1.1 Atomabsorptions- und Emissionsspektralanalyse von Wolframlegierungsblechen

Wolframlegierungsbleche werden häufig zur Elementquantifizierung nach Probenauflösung eingesetzt. Die Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) basiert auf der Absorption charakteristischen Lichts durch Atome, während die Emissionsspektrometrie (AE) die charakteristischen Spektrallinien angeregter Atome nutzt. Die Kombination beider Methoden ermöglicht die Bestimmung von Hauptelementen wie Wolfram, Nickel, Eisen und Kupfer sowie von Spurenverunreinigungen. Bei der AAS-Analyse wird die Probe in Säure gelöst, die Lösung anschließend vernebelt und in eine Flamme oder einen Graphitrohrfurnas eingeleitet. Die Elementatome absorbieren das charakteristische Licht einer Hohlkathodenlampe; die Absorptionsintensität ist konzentrationsabhängig, und der Gehalt wird anhand einer Standardkurve berechnet. Diese Methode eignet sich besonders für Wolframlegierungsbleche, insbesondere zur Bestimmung niedriger Nickel- oder Eisenkonzentrationen, da der chemische Grundzustands-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Atomabsorptionsmechanismus Selektivität gewährleistet. Die Probenvorbereitung erfordert die Berücksichtigung der geringen Löslichkeit von Wolfram; üblicherweise wird ein Gemisch aus Salpetersäure und Fluorwasserstoffsäure zur Auflösung verwendet. Störungen durch Fluoridionen werden durch die Zugabe von Borsäure zur Komplexbildung vermieden. Die Flammen-AAS eignet sich für Elemente mit höheren Konzentrationen, während die Graphitofen-AAS die Empfindlichkeit für den Nachweis von Spurenelementen verbessert.

Die optische Emissionsspektroskopie (OES) führt gelöste Proben in ein Plasma oder einen Lichtbogen zur Anregung ein und detektiert die charakteristischen Spektrallinien von Atomen oder Ionen. Die Intensität wird mittels Gitterspektroskopie und Detektor erfasst, was die simultane Bestimmung mehrerer Elemente ermöglicht. Bei Wolframlegierungsblechen erfordert der hohe Schmelzpunkt von Wolfram eine hochenergetische Anregungsquelle wie induktiv gekoppeltes Plasma (ICP-OES), wobei chemisch angeregte Übergänge umfangreiche spektrale Informationen liefern. Eine Matrixanpassungskorrektur ist notwendig, da die Wolframmatrix Hintergrundinterferenzen verursachen kann. Diese werden durch interne Standardmethoden oder Hintergrundsubtraktion optimiert. Der Vorteil der OES liegt in ihrer schnellen Multielementanalyse, wodurch sie sich für die Validierung von Produktionschargen eignet. Die beiden Technologien ergänzen sich: Die Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) ist präziser für spezifische Elemente, während die OES ein breites Spektrum abdeckt.

Der Analyseprozess umfasst die Kalibrierung des Instruments, die Erstellung von Kurven mithilfe zertifizierter Standardlösungen und die Sicherstellung einer gleichmäßigen Probenahme der Wolframlegierungsbleche, um Entmischungen zu vermeiden. Chemische Störungen wie Ionisation werden in der optischen Emissionsspektrometrie (OES) durch die Zugabe von Inhibitoren minimiert. Aus Sicherheitsgründen ist bei der Säureauflösung eine Belüftung erforderlich. Die Ergebnisse werden üblicherweise als Massenprozent angegeben, um die stöchiometrische Zusammensetzung von Legierungssystemen wie Nickel-Eisen oder Nickel-Kupfer zu beurteilen.

### **5.1.2 Quantitative Methode zur Bestimmung der Zusammensetzung von Wolframlegierungsblechen mittels Röntgenfluoreszenzspektroskopie**

Die Röntgenfluoreszenzspektroskopie (RFA) zur quantitativen Analyse von Wolframlegierungsblechen ist eine zerstörungsfreie Oberflächenanalysetechnik. Sie nutzt Röntgenstrahlen zur Anregung der Probenatome, wodurch charakteristische Fluoreszenz entsteht, deren Intensität mit dem Elementgehalt korreliert. Dies ermöglicht die schnelle Bestimmung von Elementen wie Wolfram, Nickel, Eisen und Kupfer. Die Methode wird in wellenlängendispersive (WD-RFA) und energiedispersive (ED-RFA) Verfahren unterteilt. Erstere bietet eine hohe Auflösung und eignet sich für präzise Laboranalysen, während letztere portabel und für Feldanwendungen geeignet ist. Die Probenpräparation ist einfach; die Oberfläche des Wolframlegierungsblechs muss lediglich poliert und gereinigt werden, um Störungen durch die Oxidschicht zu vermeiden. Chemisch gesehen stammen die charakteristischen Röntgenstrahlen von inneren Elektronenübergängen, was die Elementspezifität gewährleistet. Eine Anregungsquelle, beispielsweise eine Röntgenröhre, erzeugt primäre Röntgenstrahlen, die von den Probenatomen absorbiert werden und sekundäre Fluoreszenz emittieren, welche von einem Detektor erfasst wird.

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

Die quantitative Analyse basiert entweder auf der Fundamentalparametermethode oder der empirischen Korrekturmethode. Erstere berechnet den Matrixeffekt, während letztere Kurven anhand von Standardproben erstellt. Der hohe Wolframgehalt von Wolframlegierungsblechen verursacht eine starke Absorption, die matrixangepasste Standards zur Reduzierung erfordert. Die WD-RFA trennt Spektrallinien präzise mittels Kristallspektroskopie und eignet sich daher zur Quantifizierung von Hauptelementen. Die ED-RFA ist trotz geringerer Energieauflösung hocheffizient für die simultane Mehrelementanalyse. Der Vorteil der Methode liegt in ihrer zerstörungsfreien Natur, die die Probenintegrität erhält und reproduzierbare Messungen ermöglicht. Die Tiefenanalyse ist auf Oberflächen im Mikrometerbereich beschränkt und eignet sich für homogene Bleche.

Chemische Interferenzen, wie z. B. überlappende Spektrallinien, werden durch softwarebasierte Spektralanalyse aufgelöst. Die mögliche Überlappung von Wolfram-L-Linien und Nickel-K-Linien erfordert eine algorithmische Korrektur. Vakuum- oder Heliumatmosphären verbessern den Nachweis leichter Elemente, schwere Elemente sind jedoch unter atmosphärischen Bedingungen für Wolframlegierungsbleche leicht verfügbar. Die tragbare Röntgenfluoreszenz-Technologie wird für das schnelle Screening in Produktionsumgebungen weiterentwickelt. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse wurde anhand zertifizierter Referenzmaterialien verifiziert, wobei Abweichungen innerhalb akzeptabler Grenzen liegen. Das System bietet hohe Sicherheit, da keine chemischen Reagenzien benötigt werden.

### 5.1.3 Chemische Titrationsanalyse von Spurenelementen in Wolframlegierungsblechen

Die Analyse von Wolframlegierungsblechen ist eine klassische nasschemische Methode. Dabei wird die Probe gelöst und mit Standardreagenzien umgesetzt; der Endpunkt wird durch den Farb- oder Potentialwechsel eines Indikators bestimmt. Diese Methode eignet sich für spezifische Spurenverunreinigungen wie Phosphor, Schwefel oder bestimmte Metallionen. Die Probe muss vor der Analyse vollständig gelöst sein. Wolframlegierungsbleche werden häufig mit einem Gemisch aus Salpetersäure und Fluorwasserstoffsäure durch Erhitzen behandelt. Dadurch bildet sich ein löslicher Wolframkomplex, wodurch Ausfällungsstörungen vermieden werden. Spurenelemente wie Phosphor werden oft nach der Komplexierung mit Phosphormolybdänblau titriert, Schwefel wird vor der Bestimmung durch Fällung abgetrennt. Zu den Titrationsarten gehören Redox-, Komplexierungs- und Säure-Base-Titrationsarten, die je nach den Eigenschaften des Elements ausgewählt werden.

Die komplexometrische Titration verwendet üblicherweise EDTA als Titrationsmittel, um geringfügige Abweichungen in Nickel- oder Eisenkonzentrationen zu bestimmen, wobei das chemische Gleichgewicht die Reaktion steuert. Die Redox-Titration eignet sich für Schwefel oder bestimmte Übergangsmetalle; hierfür werden häufig Kaliumpermanganat- oder iodometrische Titrationsarten eingesetzt. Die Wahl des Indikators ist entscheidend; ein deutlicher Farbumschlag signalisiert den Endpunkt. Probenvolumen und -konzentration müssen präzise bestimmt werden; die Mikroanalyse verstärkt Fehler und reduziert sie durch mehrere parallele Analysen. Eine chemische Vorbehandlung ist notwendig; beispielsweise muss Phosphor aus der Wolframmatrix extrahiert werden, um Interferenzen mit dem Hauptelement zu vermeiden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Vorteile der Methode liegen in der einfachen Ausrüstung, den geringen Kosten und der Eignung zur labortechnischen Überprüfung spektraler Ergebnisse. Die Empfindlichkeit lässt sich durch Reaktionsverstärkung, beispielsweise durch spektrophotometrische Endpunktbestimmung, verbessern. Zu den Sicherheitsvorkehrungen gehören die Gewährleistung ausreichender Belüftung beim Umgang mit Säure und die Vermeidung der Gefahren durch Fluorwasserstoff.

## 5.2 Methoden zur Mikrostrukturcharakterisierung von Wolframlegierungsblechen

Wolframlegierungsbleche werden primär mittels Elektronenmikroskopie (REM), Spektralanalyse und Beugungsmethoden untersucht. Diese Verfahren ermöglichen die Untersuchung der Kornverteilung, der Phasenzusammensetzung und der Defekteigenschaften des Materials auf verschiedenen Skalen und tragen so zum Verständnis des Zusammenhangs zwischen Struktur und Eigenschaften bei. Die Rasterelektronenmikroskopie (REM) dient der Untersuchung der Oberflächenmorphologie und der Zusammensetzungsverteilung, die Röntgenbeugung (XRD) analysiert Phasen und Kristallstrukturen, und die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) konzentriert sich auf innere Defekte. Die Probenpräparation vor der Charakterisierung umfasst Schneiden, Polieren und Ionenstrahlätzen, um Verunreinigungen auszuschließen. Die Wahl der Methode hängt vom Forschungsschwerpunkt ab: REM eignet sich für die Oberflächenanalyse, Beugung für Kristallinformationen und TEM für Defekte im Nanometerbereich. Die Kombination dieser Methoden ermöglicht eine multidimensionale Charakterisierung; beispielsweise kann die Kombination von REM und Beugung die Phasenstruktur bestätigen. Die chemische Grundlage dieser Methoden liegt in der Wechselwirkung zwischen Elektronen und Materie, wobei die Anregungssignale die atomare Anordnung widerspiegeln. Die Kontrolle der Umgebungsbedingungen, wie z. B. Vakuum, ist entscheidend, um Oxidation zu verhindern.

### 5.2.1 Rasterelektronenmikroskopische Morphologie- und Zusammensetzungskartierung von Wolframlegierungsblechen

Wolframlegierungsbleche sind ein gängiges Verfahren zur Charakterisierung der Mikrostruktur. Durch Abtasten der Probenoberfläche mit einem Elektronenstrahl, wodurch Sekundär- und Rückstreuелектронensignale erzeugt werden, lassen sich die Morphologie der Wolframpartikel, die Verteilung der Bindemittelphase und die Grenzflächeneigenschaften darstellen. Gleichzeitig erfasst die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDS) die räumliche Verteilung der Elemente. Dieses Verfahren basiert auf der Wechselwirkung zwischen Elektronen und Atomen. Einfallende Elektronen regen die Atome der Probe an und erzeugen charakteristische Signale, Sekundärelektronen spiegeln die Oberflächenmorphologie wider, und Rückstreuелектронен hängen von Unterschieden in der Ordnungszahl ab. Die hohe Ordnungszahl von Wolfram führt dazu, dass seine Partikel heller als die Bindemittelphase erscheinen, was die Unterscheidung erleichtert. Die Probenpräparation umfasst mechanisches Polieren, gefolgt von elektrolytischem oder Ionenstrahlpolieren. Die Oberfläche muss leitfähig mit Kohlenstoff oder Gold beschichtet werden, um Aufladungseffekte zu vermeiden. Die Bildgebung erfolgt im Vakuum, wobei die Beschleunigungsspannung zur Optimierung von Auflösung und Eindringtiefe angepasst wird; niedrige Spannung eignet sich für die Darstellung von Oberflächendetails, während hohe Spannung eine tiefere Beobachtung ermöglicht.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bei der morphologischen Untersuchung wird die Zweiphasenstruktur des Wolframlegierungsblechs deutlich sichtbar. Die Wolframpartikel sind kugelförmig oder polyedrisch, wobei die Binderphase die Zwischenräume ausfüllt und ein durchgehendes Netzwerk bildet. Die Vergrößerung kann angepasst werden, um Korngrenzenrisse oder Poren zu untersuchen. Die Kartierung der chemischen Zusammensetzung nutzt einen Röntgendetektor zur Erfassung charakteristischer Peaks, und die Softwareverarbeitung generiert Elementverteilungskarten. Wolframbereiche zeigen dichte Signale, während Nickel oder Eisen in der Binderphase angereichert sind, was auf Entmischungs- oder Gradientenbereiche hinweist. Die Auflösung der Kartierung hängt von der Detektoreffizienz und der Scanzeit ab; längere Scans verbessern das Signal-Rausch-Verhältnis. Der Vorteil dieser Methode liegt in der intuitiven Kombination morphologischer und chemischer Informationen, die die Analyse von Strukturdefekten unterstützt, welche durch Sinterinhomogenitäten verursacht werden. Zusätzliche Verfahren wie die Elektronenrückstreuung können die Kristallorientierung weiter charakterisieren; chemisch gesehen beeinflussen Elemente, die sich an Korngrenzen entmischen, das Beugungsmuster.

Darüber hinaus spielt diese Methode eine Rolle bei der Verfolgung von Strukturveränderungen nach der Wärmebehandlung. Vergleiche geglühter Proben zeigen eine verbesserte Partikelsphäroidisierung und Phasengrenzflächenbindung. Umgebungsscanning-Modi ermöglichen die Untersuchung nasser Proben, Wolframlegierungsbleche werden jedoch typischerweise im trockenen Zustand analysiert. Bildverarbeitungssoftware unterstützt die Quantifizierung der Partikelgrößenverteilung und des Phasenvolumenanteils. Chemische Kartierungsdaten können mit Morphologiebildern überlagert werden, um ein Gesamtbild zu erhalten. Die Kartierung von Verunreinigungselementen wie Sauerstoff zeigt die Lage von Oxideinschlüssen und dient als Grundlage für Reinigungsprozesse. Die Einschränkung dieser Methode liegt in ihrer Oberflächenempfindlichkeit; Querschnittsuntersuchungen sind erforderlich, um die Tiefenstruktur zu beurteilen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit Morphologie- und Zusammensetzungskartierung einen umfassenden mikroskopischen Charakterisierungsansatz für Wolframlegierungsbleche bietet. Sie ermöglicht die Visualisierung der Strukturchemie durch elektronische Signalmechanismen und unterstützt die Qualitätsbewertung von Materialien in Präzisionsanwendungen. Diese Methode ermöglicht zudem die effektive Identifizierung struktureller Heterogenität und trägt so zur Optimierung der Prozessparameter bei.

### 5.2.2 Röntgenbeugungsanalyse der Phasen und Kristallstruktur von Wolframlegierungsblechen

von Wolframlegierungsblechen erfolgt zerstörungsfrei. Dabei wird die Wechselwirkung von Röntgenstrahlen mit den Atomlagen eines Kristalls genutzt, um Beugungspeaks zu erzeugen. Diese Peaks dienen der Bestimmung der Phasenzusammensetzung und der Auflösung der Gitterparameter und tragen so zum Verständnis des Phasengleichgewichts und der strukturellen Stabilität des Legierungssystems bei. Die Analyse basiert auf dem Bragg'schen Gesetz: Einfallende Röntgenstrahlen werden vom Kristall reflektiert, die Peakpositionen entsprechen den Netzebenenabständen, und die Intensität spiegelt die atomare Anordnung wider. Als Proben können ganze Bleche oder Pulver mit glatten Oberflächen verwendet werden, um Streuinterferenzen zu vermeiden. Üblicherweise wird Cu-K $\alpha$ -Strahlung als Quelle eingesetzt, Detektoren erfassen die Beugungssignale, und eine Software

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



vergleicht Standardkarten, um Phasen wie die kubisch-raumzentrierten Peaks von Wolfram und die kubisch-flächenzentrierten Peaks der Binderphase zu identifizieren. In der Phasenanalyse zeigen Wolframlegierungsbleche starke und scharfe Wolfram-Peaks, während die Peaks der Binderphase schwächer sind. Die Auflösung von Legierungselementen verursacht Peakverschiebungen, die den Grad der Mischkristallbildung aufzeigen.

Die Kristallstrukturanalyse beinhaltet die Peak-Anpassung zur Berechnung der Gitterkonstanten. Der  $\alpha$ -Parameter der Wolframphase ändert sich mit der Temperatur nur geringfügig, während sich die Binderphase je nach Eisen- oder Kupferverhältnis ausdehnt oder zusammenzieht. Der Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf die Beugung spiegelt sich in der Peakbreite wider; Kornverfeinerung führt zu einer Verbreiterung, während rekristallisierte Proben eine Verengung der Peaks aufweisen. Die quantitative Phasenanalyse schätzt Volumenanteile anhand integrierter Intensitätsverhältnisse und trägt so zum Verständnis der Sinterphasenbildung bei. Zu den Vorteilen dieser Methode zählen das schnelle Scannen großer Probenmengen und die Anwendbarkeit sowohl in Labor- als auch in tragbaren Geräten. Erweiterte Modi, wie die In-situ-Heizbeugung, ermöglichen die Verfolgung von Hochtemperatur-Phasenübergängen und die chemische Beobachtung des Wolfram-Auflösungsverhaltens. Die Datenverarbeitung umfasst die Hintergrundsubtraktion und die Peak-Trennung; komplexe Spektren erfordern eine Mehrpeak-Anpassung.

Darüber hinaus eignet sich diese Analyse zur Bewertung von Walzverformungsstrukturen; Variationen in der Intensität der Texturpeaks spiegeln die Orientierungsverteilung wider, und chemisch betrachtet beeinflusst die verformungsinduzierte Dehnung die Peakverschiebung. Verunreinigungsphasen wie Oxide weisen schwache, aber detektierbare Peaks auf, die die Reinigung steuern. Die Umgebungskontrolle mittels Vakuum oder Inertgas verhindert Störungen durch Oxidationspeaks. Die Beugungsergebnisse werden durch die Kombination dieser Methoden mit anderen Charakterisierungstechniken, wie z. B. der Elektronenmikroskopie, bestätigt.

### **5.2.3 Beobachtung mikroskopischer Defekte in Wolframlegierungsblechen mittels Transmissionselektronenmikroskopie**

von Wolframlegierungsblechen mittels Elektronenbeugung ist eine hochauflösende Methode. Durch den Einsatz eines hochenergetischen Elektronenstrahls, der dünne Proben durchdringt und Hellfeld- sowie Dunkelfeldbilder und Beugungsmuster erzeugt, lassen sich nanoskalige Defekte wie Versetzungen, Leerstellen, Korngrenzen und Ausscheidungen sichtbar machen. Dies unterstützt die Analyse des Einflusses der Struktur auf die Leistungsfähigkeit. Die Beobachtung basiert auf der Wechselwirkung zwischen Elektronenwellen und dem Kristall. Die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) zeigt Defektkontraste, während die Elektronenbeugung lokale Informationen über den Kristall liefert. Um Verformungen oder Verunreinigungen zu vermeiden, müssen die Proben ionenstrahlgeätzt und auf wenige zehn Nanometer dünn gemacht werden. Hohe Beschleunigungsspannungen sind erforderlich, um die hohe Dichte des Wolframs zu durchdringen. Chemisch gesehen hängt die Elektronenstreuung von der Ordnungszahl ab, und Wolfram weist einen relativ starken Kontrast zur Bindemittelphase auf. Bei

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

der Defektbeobachtung erscheinen Versetzungslinien im Hellfeldbild gekrümmt, und die Segregation chemischer Versetzungskernelemente beeinflusst die Migration.

Die Beobachtung von Korngrenzen offenbart die Grenzflächenstruktur; hochauflösende Bildgebung zeigt die atomare Anordnung; chemisch segregierende Elemente wie Bor reichern sich an der Grenzfläche an und verstärken die Bindung. Ausgeschiedene Phasen, wie feine Wolframpartikel, werden in einem Gitter innerhalb der Binderphase abgebildet, wodurch ihre Form und Verteilung beobachtet werden können. Dunkelfeldmikroskopie hebt spezifische Defekte hervor, und Beugungsvergleiche analysieren Versetzungstypen. Der Vorteil dieser Methode liegt in ihrer atomaren Auflösung, kombiniert mit Energiefilterung zur Eliminierung von Dickeneffekten. In-situ-Erhitzung wird eingesetzt, um die Defektdynamik zu beobachten und Leerstellen durch Hochtemperaturdiffusion chemisch zu reparieren. Die Datenverarbeitung umfasst Bildfilterung und Simulationsabgleich zur Bestätigung des Defektmodells.

Darüber hinaus eignet sich diese Beobachtung zur Verfolgung von Walzverformungsdefekten; kaltverformte Proben weisen hochdichte Versetzungsnetzwerke auf, die sich nach dem Glühen verringern. Verunreinigungsbedingte Defekte, wie z. B. nadelförmige Verbindungen, können abgebildet werden, um gezielte Korrekturmaßnahmen zu ermöglichen. Ein hohes Umgebungsvakuum wird verwendet, um Kohlenstoffverunreinigungen zu vermeiden. Die Methode kombiniert elementare Kartierung mittels Rastertransmissionselektronenmikroskopie (STEM), um die chemische Information über Defekte zu erweitern.

### 5.3 Leistungsindikatoren – Prüfspezifikationen für Wolframlegierungsbleche

Wolframlegierungsbleche basieren primär auf nationalen und branchenspezifischen Normen sowie internen Unternehmensvorgaben. Diese Vorgaben umfassen Methoden zur Bestimmung wichtiger Parameter wie Dichte, Härte, mechanische Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit und gewährleisten so die Konsistenz und Zuverlässigkeit des Materials in industriellen Anwendungen. Der Prüfprozess legt Wert auf repräsentative Proben, Gerätekalibrierung und Umgebungsbedingungen, beispielsweise die Durchführung der Prüfung unter konstanter Luftfeuchtigkeit und Raumtemperatur. Dichte und Schüttdichte werden mittels Wasserverdrängung oder Gasverdrängung gemessen, die Härte nach Brinell, Vickers oder Rockwell. Die Vorgaben beinhalten auch Anforderungen an die Wiederholbarkeit; Mittelwerte aus mehreren Proben dienen der Beurteilung der Gleichmäßigkeit. Die chemische Zusammensetzung beeinflusst die Leistungsprüfung; bei hohem Wolframgehalt muss eine Korrektur von Messfehlern berücksichtigt werden. Prüfberichte müssen das Gerätemodell, die Normnummer und eine Abweichungsanalyse enthalten.

#### 5.3.1 Verfahren zur Prüfung der Dichte und Packungsdichte von Wolframlegierungsblechen

Wolframlegierungsbleche werden mittels Wasserverdrängung nach Archimedes und Gasverdrängung untersucht. Ersteres eignet sich für Routineuntersuchungen in Laboren, letzteres für hochpräzise Proben oder solche, die nicht in Flüssigkeit eingetaucht werden können. Bei dieser Methode wird die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Materialdichte anhand des Prinzips der Volumenverdrängung berechnet und die Packungsdichte durch Vergleich mit der theoretischen Dichte ermittelt. Für die Wasserverdrängung wird die Probe zunächst getrocknet und gewogen, anschließend in destilliertes Wasser oder Ethanol eingetaucht und erneut gewogen. Die Flüssigkeit muss so gewählt werden, dass keine Reaktion mit der Legierung stattfindet und keine Oberflächenauflösung erfolgt. Die Berechnungsformel berücksichtigt die Flüssigkeitsdichte und eine Temperaturkorrektur, um eine genaue Messung zu gewährleisten. Bei regelmäßig geformten Proben wird das Volumen direkt gemessen; unregelmäßig geformte Bleche werden aufgehängt und mit einem dünnen Faden eingetaucht. Um Störungen durch Luftblasen zu minimieren, werden mehrere Messungen durchgeführt und gemittelt.

Das Gasverdrängungsverfahren verwendet Helium oder Stickstoff. Die Probe wird in einen Behälter mit bekanntem Volumen gegeben, und die Gasdruckänderungen spiegeln das Probenvolumen wider. Chemisch inerte Gase verhindern Oxidation. Der Vorteil des Verfahrens liegt in der Durchführung unter trockenen Bedingungen, wodurch es sich für dünne Bleche oder leicht oxidierbare Oberflächen eignet. Dichteberechnungen erfordern einen theoretischen Dichtereferenzwert, der auf einem gewichteten Mittelwert der Komponenten basiert; ist Wolfram dominant, liegt der theoretische Wert nahe dem von reinem Wolfram. Die Prüfvorgaben erfordern saubere, öl- und oxidfreie Proben sowie Messungen nach dem Polieren der Oberfläche. Die Umgebungstemperatur wird auf Standard-Raumtemperatur gehalten, und die Luftfeuchtigkeit ist niedrig, um den Einfluss von adsorbiertem Wasser zu vermeiden.

Dieses Verfahren findet breite Anwendung bei der Chargenprüfung in der Produktion. Durch Mehrpunktprobenahme wird die Gleichmäßigkeit beurteilt und der Sinterprozess bei größeren Abweichungen nachverfolgt. Die chemische Reinheit beeinflusst die Ergebnisse; Verunreinigungen und Porosität reduzieren die gemessene Dichte. Standardblöcke dienen der Gerätekalibrierung und müssen regelmäßig überprüft werden. Bei der Prüfung dünner Proben ist ein Stapeln oder Falten erforderlich, um Biegefehler zu vermeiden. Die Ergebnisse werden in Gramm pro Kubikzentimeter als prozentualer Anteil der Dichte angegeben. Die Spezifikationen legen Wert auf Sicherheit; beim Wasserverdrängungsverfahren ist auf die Verdunstung der Flüssigkeit zu achten, beim Gasverfahren ist die Dichtigkeit zu überprüfen.

### 5.3.2 Prüfverfahren zur Bestimmung der Härte von Wolframlegierungsblechen

Wolframlegierungsbleche werden unter anderem nach Brinell, Vickers und Rockwell geprüft. Die Wahl des Prüfverfahrens hängt von der Materialdicke und dem erwarteten Härtewert ab. Die Brinellhärte eignet sich zur Bestimmung der Gesamthärte, während die beiden anderen Verfahren für die Oberflächenhärte oder dünne Bleche verwendet werden. Diese Methoden bewerten den Widerstand gegen plastische Verformung anhand der Größe oder Tiefe des Eindrucks. Bei der Brinellhärteprüfung wird eine Stahlkugel oder eine Hartmetallkugel als Eindringkörper unter einer definierten Last in die Probenoberfläche gedrückt. Nach einer bestimmten Haltezeit wird der Eindruckdurchmesser gemessen, um den Härtewert zu berechnen. Das Eindringkörpermaterial muss chemisch verschleißfest sein, um Kratzer durch die Wolframphase zu vermeiden. Die Probenoberfläche sollte glatt poliert und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ausreichend dick sein, um Verformungen auf der Rückseite zu verhindern. Die Lastwahl berücksichtigt die hohe Härte der Legierung und ist typischerweise hoch, um einen deutlichen Eindruck zu erzeugen.

Die Vickers-Härteprüfung verwendet einen Diamantpyramiden-Eindringkörper mit einem breiten Lastbereich und eignet sich für Messungen im Mikrobereich. Die diagonale Eindringtiefe wird unter einem Mikroskop gemessen, wobei die chemische Inertheit des Diamanten die Genauigkeit gewährleistet. Bei der Prüfung dünner Bleche werden niedrige Lasten verwendet, um ein Eindringen zu vermeiden. Die Rockwell-Härteprüfung ist schnell: Nach der Vorlast erfolgt die Hauptlast; die Tiefendifferenz wird direkt abgelesen, und die HRA- oder HRC-Skala eignet sich für Wolframlegierungsbleche. Die Spezifikationen erfordern Mehrpunktprüfung, Mittelwertbildung über die Rasterverteilung und Bewertung der Gleichmäßigkeit. Die Kontrolle von Umgebungerschütterungen und die horizontale Positionierung des Messgeräts sind unerlässlich.

Darüber hinaus eignet sich diese Methode zur Überwachung des Verhaltens nach der Wärmebehandlung und zeigt eine Erholung von der Härteabnahme, die bei geprüften Proben beobachtet wurde. Die chemische Zusammensetzung beeinflusst die Ergebnisse; ein höherer Anteil der Bindemittelphase führt zu einer geringeren Härte. Oberflächenbehandlungen wie Beschichtungen müssen vor der Messung vom Substrat entfernt werden. Standardblöcke dienen der Gerätekalibrierung und regelmäßigen Überprüfung. Um Kanteneffekte zu vermeiden, werden Biege- und Fixierversuche an dünnen Blechen durchgeführt. Die Ergebnisse werden in HB-, HV- oder HR-Einheiten angegeben, wobei die Last spezifiziert ist. Die Spezifikationen legen Wert auf Sicherheit; ein Eindringkörperschutz verhindert ein Brechen des Prüfkörpers.

### 5.3.3 Prüfverfahren zur Bestimmung der Korrosionsbeständigkeit von Wolframlegierungsblechen

Die Korrosionsbeständigkeit von Wolframlegierungsblechen wird mittels Immersionstests, elektrochemischen Prüfungen und Salzsprühnebeltests untersucht. Diese Methoden simulieren verschiedene korrosive Umgebungen, um die Beständigkeit des Materials gegenüber sauren, alkalischen und salzhaltigen Medien zu bewerten und so den Oberflächenschutz und die Zusammensetzung zu optimieren. Immersionstests sind die grundlegendste Methode. Die Proben werden in ein definiertes korrosives Medium eingetaucht, und Gewichtsveränderungen, Oberflächenmorphologie und Zusammensetzung der Lösung werden regelmäßig beobachtet. Chemisch werden Medien wie Schwefelsäure, Salzsäure oder Natriumchloridlösungen ausgewählt, und Temperatur und Zeit werden gemäß den Normen eingestellt. Nach dem Test wird die Probe gereinigt, der Gewichtsverlust zur Berechnung der Korrosionsrate gemessen, und die metallografische Oberflächenuntersuchung dokumentiert Lochfraß oder gleichmäßige Korrosion. Der Vorteil dieser Methode liegt in ihrer Einfachheit und Verständlichkeit, wodurch sie sich für Langzeituntersuchungen des Korrosionsverhaltens eignet.

Elektrochemische Prüfungen liefern dynamische Korrosionsinformationen, vorwiegend mittels Polarisationskurven und Impedanzspektroskopie. Die Probe dient als Arbeitselektrode und ist in einem Drei-Elektroden-System in einen Elektrolyten eingetaucht. Durch Potentialscan werden

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Stromänderungen erfasst, und die Korrosionsstromdichte wird mittels Tafel-Extrapolation berechnet. Das Selbstkorrosionspotential spiegelt die thermodynamische Stabilität wider. Die Wechselstrom-Impedanzspektroskopie misst Grenzflächenwiderstand und -kapazität, und ein Ersatzschaltbild wird angepasst, um die Schutzwirkung der Passivierungsschicht zu bewerten. Aufgrund der hohen Reaktivität der Binderphase in Wolframlegierungsblechen muss die Stabilität der Referenzelektrode während der Prüfung sorgfältig berücksichtigt werden. Salzsprühnebeltests simulieren eine Meeresumgebung, indem Natriumchloridlösung in eine neutrale Salzsprühkammer gesprüht wird. Oberflächenrost oder Lochfraß werden periodisch beobachtet; chemisch gesehen führt das Eindringen von Chloridionen zu lokalisierter Korrosion, und die Bewertungskriterien basieren auf der Korrosionsfläche.

Die Prüfspezifikationen fordern eine gleichmäßige Oberflächenbeschaffenheit der Proben; Prüfungen nach dem Polieren oder Beschichten sind zu berücksichtigen. Die Umgebungsbedingungen müssen konstante Temperatur und Luftfeuchtigkeit gewährleisten und äußere Einflüsse vermeiden. Es sind mehrere Parallelprüfungen durchzuführen, und der Mittelwert ist zur statistischen Analyse der Korrosionstiefe bzw. -rate heranzuziehen. Korrosionsprodukte sind chemisch zu analysieren, und Oxidphasen sind mittels Röntgenbeugung zu identifizieren. Es ist eine Kombination verschiedener Methoden anzuwenden, darunter qualitative Immersionsprüfung, quantitative elektrochemische Analyse und beschleunigte Salzsprühnebelprüfung. Zu den Sicherheitsvorkehrungen gehören die Gewährleistung einer ausreichenden Belüftung des Säurenebels und die Neutralisierung der Abfallflüssigkeit.

#### 5.3.4 Prüfverfahren zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit von Wolframlegierungsblechen

Zu den wichtigsten Methoden zur Prüfung der Verschleißfestigkeit von Wolframlegierungsblechen zählen Stift-Scheiben-Verschleißtests, Schleifscheiben-Verschleißtests und oszillierende Reibungstests. Diese Methoden simulieren das Verschleißverhalten unter Trockenreibung oder Schmierung, bestimmen den Volumenverlust und den Reibungskoeffizienten des Materials unter Kontaktspannung und tragen zur Optimierung von Härte und Oberflächenbehandlung bei. Beim Stift-Scheiben-Verschleißtest wird die Probe als Scheibe fixiert und eine Last auf den Stift aufgebracht, um eine Rotation zu bewirken. Chemische Reibungswärme induziert oxidativen Verschleiß, und die Verschleißrate wird durch Messung des Gewichtsverlusts oder der Verschleißspurtiefe berechnet. Last und Drehzahl sind einstellbar, um verschiedene Betriebsbedingungen zu simulieren. Trockenreibung verdeutlicht adhäsiven Verschleiß, während Schmierung die Wirkung von Abrasivpartikeln untersucht.

Der Schleifscheibenverschleißtest verwendet eine Standard-Schleifscheibe, um die Probenoberfläche zu bearbeiten und den Gewichtsverlust pro Zeiteinheit zu messen. Chemisch gesehen führt das Einbetten von Schleifkörnern zu Schneidverschleiß, der sich für hochharte Wolframlegierungsbleche eignet. Die Testspezifikationen legen die Korngröße und den Anpressdruck der Schleifscheibe fest, um reproduzierbare Ergebnisse zu gewährleisten. Der Reibungstest simuliert eine lineare Bewegung, indem eine Kugel oder ein Stift auf der Probe hin und her gleitet. Sensoren erfassen die Reibungskraft in Echtzeit und berechnen den mittleren Reibungskoeffizienten. Chemisch gesehen führt Oberflächenermüdung zu Abplatzungen, und die Mikrostruktur der Verschleißspur wird untersucht, um

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

den Mechanismus zu analysieren. Mittels Laser-Konfokalmikroskopie oder Profilometrie wird das Volumen der Verschleißspur quantifiziert.

Die Prüfvorgaben erfordern eine gleichmäßige Oberflächenpolitur der Proben und multidirektionale Prüfungen zur Beurteilung der Anisotropie. Die Umgebungsbedingungen müssen kontrollierbar sein, wobei Faktoren wie der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf den oxidativen Verschleiß berücksichtigt werden müssen. Durch chemische Reinigung werden Verschleißpartikel entfernt, wodurch eine hohe Wiegegenauigkeit gewährleistet wird. Die verschlissene Oberfläche wird mittels Rasterelektronenmikroskopie analysiert, und die energiedispersive Röntgenspektroskopie dient der Identifizierung des Transferfilms. Es wird eine Kombination verschiedener Methoden angewendet, darunter die Messung des Volumenverlusts mittels Stift-Scheibe-Verfahren und die Bestimmung der dynamischen Koeffizienten der oszillierenden Belastung. Zu den Sicherheitsvorkehrungen gehört die Staubabsaugung, um das Einatmen von Staub zu verhindern.

### 5.3.5 Prüfverfahren zur Bestimmung der Festigkeit von Wolframlegierungsblechen

Wolframlegierungsbleche werden Zug-, Biege- und Druckversuchen unterzogen. Diese Methoden messen die Zugfestigkeit, die Streckgrenze und das Bruchverhalten des Materials und tragen so zur Beurteilung seiner mechanischen Zuverlässigkeit und Verarbeitbarkeit bei. Der Zugversuch ist die gebräuchlichste Methode. Die Proben werden zu standardisierten Hantel- oder Rechteckstreifen verarbeitet und in einer Universalprüfmaschine einer einachsigen Zugbelastung unterzogen. Die Last-Verschiebungs-Kurve wird aufgezeichnet, wobei die chemische Versetzungsgleitung die plastische Verformung dominiert. Zugfestigkeit und Dehnung werden berechnet. Zur Vermeidung von Beschädigungen durch Einspannen werden bei Blechprüfungen berührungslose Extensometer eingesetzt. Die Dehnungsrate wird langsam gesteuert, um quasistatisches Verhalten zu erfassen.

Biegeversuche eignen sich für dünne Bleche. Dabei werden Drei- oder Vierpunktbiegekräfte angewendet, um Biegefestigkeit und Durchbiegung zu messen. Chemische Analysen beurteilen die Oberflächenkompression und die Zugfestigkeit der inneren Schichten und bewerten die Haftung zwischen den Schichten. Druckversuche werden an dicken Blechen oder Blöcken durchgeführt. Dabei werden kurze zylindrische Proben axial komprimiert, um die Spannungs-Dehnungs-Kurven zu erfassen. Wolframlegierungsbleche weisen bei hohen Dichten nur eine begrenzte Plastizität auf. Die Prüfspezifikationen erfordern standardisierte Probenabmessungen und eine fehlerfreie Oberfläche. Die Umgebungstemperatur ist einstellbar, um den Festigkeitsabfall bei hohen Temperaturen zu untersuchen. Die Rissausbreitung wird während der Prüfung in Echtzeit mittels Schallemissionsanalyse überwacht.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsbleche

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Kapitel Sechs: Herstellungsverfahren für Wolframlegierungsbleche

### 6.1 Herstellungsverfahren und Klassifizierung von Wolframlegierungsblechen

Wolframlegierungsbleche werden hauptsächlich nach dem pulvermetallurgischen Verfahren hergestellt. Dieses Verfahren umfasst mehrere Verfahrensschritte vom Rohmaterialpulver bis zum fertigen Blech, darunter Pulvermischen, Pressen, Sintern, thermomechanische Bearbeitung und Nachbehandlung. Die Klassifizierung erfolgt nach Legierungssystem, Ziel-Eigenschaften und Dickenvorgaben. Das Hauptherstellungsverfahren basiert auf dem Flüssigphasensintern, ergänzt durch Festphasen- oder Aktivsinterverfahren. Die Prozessauslegung berücksichtigt die Feuerfestigkeit und hohe Dichte von Wolfram, um eine Verdichtung und ein gleichmäßiges Mikrogefüge zu gewährleisten. Ein typischer Prozess beginnt mit dem homogenen Mischen von hochreinem Wolframpulver und Bindemittelpulver, gefolgt vom Kaltisostatpressen zu einem Rohling, dem Hochtemperatursintern zur Partikelumlagerung und -bindung sowie der schrittweisen Verdünnung durch Warmwalzen, Zwischenglühen zum Spannungsabbau und abschließender Oberflächenbearbeitung. Bei der Klassifizierung von Blechen mit hoher Dichte liegt der Fokus auf Wolframgehalt und Dichte, während bei Blechen mit niedriger Dichte Pseudolegierungen oder Verbundstrukturen zum Einsatz kommen können. Die Blechdicke beeinflusst die Prozesswahl: Dünne Bleche erfordern Präzisionswalzen, während bei dicken Blechen der Fokus auf dem Vorstanzen liegt.

Die Flexibilität des Herstellungsverfahrens ermöglicht anwendungsspezifische Anpassungen. So wird beispielsweise bei medizinischen Schutzfolien Wert auf Gleichmäßigkeit gelegt, während bei industriellen, verschleißfesten Folien die Verstärkung durch die Hartphase im Vordergrund steht. Chemische Prinzipien durchdringen den gesamten Prozess: Die Benetzung durch die flüssige Phase treibt die Verdichtung beim Sintern voran, und die Verformungskoordination während der Verarbeitung basiert auf der Plastizität der Bindemittelphase. Die Kontrolle der Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise die Verwendung einer Wasserstoffatmosphäre zur Verhinderung von Oxidation, und das Reinheitsmanagement zur Vermeidung von Defekten durch Verunreinigungen sind entscheidend. Die Prozessoptimierung, insbesondere die Integration von Heißisostatischem Pressen und Funkenplasmasintern in den letzten Jahren, verbessert die Qualität der Ausgangsrohlinge und vereinfacht die Weiterverarbeitung. Eine Klassifizierung kann auch auf dem Sinterverfahren basieren: traditionelles Sintern im Wasserstoffofen und Vakuumsintern. Ersteres ist kostengünstiger, während letzteres eine bessere Kontrolle der Verunreinigungen ermöglicht.

#### 6.1.1 Hauptherstellungsverfahren für Wolframlegierungsbleche

Wolframlegierungsbleche werden pulvermetallurgisch hergestellt und lassen sich in drei Verfahren unterteilen: traditionelles Flüssigphasensintern, aktiviertes Sintern und Schmelzinfiltrationsverfahren. Die Wahl des Verfahrens richtet sich nach dem Legierungssystem und den Leistungszielen, um eine vollständige Umwandlung vom Pulver zum Blech zu gewährleisten. Das traditionelle Flüssigphasensintern ist das ausgereifteste Verfahren. Zunächst wird Wolframpulver in einem bestimmten Verhältnis mechanisch oder kugelmahlen mit Nickel-, Eisen- oder Kupferpulver

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

vermischt. Anschließend wird die Mischung kalisostatisch zu einem großen Block verpresst. Unter Wasserstoffatmosphäre wird die Temperatur über die Schmelztemperatur erhöht und gehalten, um das Schmelzen und Benetzen der Bindemittelphase sowie die Verdichtung der Wolframpartikel zu fördern und so eine Umlagerung und Auflösung-Wiederfällung zu erreichen. Nach dem Sintern wird der Block bei hoher Temperatur geschmiedet oder warmgewalzt, um seine Dicke schrittweise auf ein mittleres Niveau zu reduzieren. Anschließend wird er warm- und kaltgewalzt und mehrfach vakuumgeglüht, um Spannungen abzubauen. Zum Schluss wird es gebeizt oder zu Blättern poliert.

Das aktivierte Sinterverfahren eignet sich für schwer zu verdichtende Systeme. Dem Pulver werden geringe Mengen an Aktivatoren wie Palladium und Nickel vorab zugesetzt, um die Sintertemperatur zu senken und die Festphasendiffusion zu fördern. Chemisch gesehen agglomerieren die Aktivatoren an der Grenzfläche und reduzieren so die Oberflächenenergie. Dieses Verfahren ist für Wolfram-Kupfer- oder wolframreiche Bleche geeignet. Zu seinen Vorteilen zählen der geringe Energieverbrauch und das feine Mikrogefüge, jedoch erfordert der Aktivatorrückstand eine Nachbehandlung. Beim Schmelzinfiltrationsverfahren wird zunächst ein poröses Wolframgerüst gepresst und gesintert, anschließend wird flüssiges Kupfer oder Silber im Vakuum infiltriert. Chemisch gesehen füllt das flüssige Metall die Poren und bildet eine Pseudo-Legierungsstruktur. Das anschließende Walzen ermöglicht eine Ultradünnung und eignet sich daher für thermisch und elektrisch leitfähige Bleche.

Bei der Wahl des Produktionsverfahrens werden Skalierbarkeit und Kosten berücksichtigt. Traditionelle Verfahren eignen sich für die Massenproduktion von Nickel-Eisen- und Nickel-Kupfer-Systemen, während Schmelzinfiltrationsverfahren für Wolfram-Kupfer-Systeme konzipiert sind. Hilfsprozesse wie das Heißisostatische Pressen können in jedes Verfahren integriert werden, um die Anfangsdichte zu verbessern und Walzrisse zu reduzieren. Die chemische Steuerung erfolgt über den gesamten Prozess, die Taupunktregulierung der Atmosphäre verhindert Oxidation, und die Anpassung der Pulverpartikelgröße beeinflusst die Mischhomogenität. Oberflächenbehandlungen wie die chemische Galvanisierung werden an den Prozessenden integriert, um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern. Aus Umweltgründen werden recycelte Schrottmaterialien pulverisiert und wiederverwendet.

#### **6.1.2 Prozessunterschiede zwischen hochdichten und nicht hochdichten Wolframlegierungsblechen**

Hochdichte und nicht-hochdichte Wolframlegierungsbleche unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung, den Sinterparametern und den Verarbeitungsmethoden. Bei ersteren wird der Wolframgehalt und die Dichte maximiert, während letztere auf spezifische Funktionen wie Wärmeleitfähigkeit oder Niedrigdichtegleichgewicht abzielen. Hochdichte Bleche weisen typischerweise einen höheren Wolframgehalt und einen geringeren Anteil an Bindemittelphase auf. Das Verfahren nutzt verlängertes Halten der flüssigen Phase und sekundäres heißisostatisches Pressen, um die Porosität zu minimieren und das Volumen der weichen Phase chemisch zu reduzieren, um die theoretische Dichte anzunähern. Die Sintertemperatur wird präzise innerhalb des geeigneten Bereichs der flüssigen Phase gesteuert, um übermäßiges Fließen und damit ein Kollabieren zu vermeiden. Die Verarbeitungsmethode beinhaltet hochreduziertes Warmwalzen, gefolgt von einer sorgfältigen

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



Zwischenglühung, um ein gleichmäßiges Mikrogefüge und eine hohe Dickenhomogenität des Endprodukts zu gewährleisten.

Bei Blechwerkstoffen mit geringer Dichte, wie beispielsweise Wolfram-Kupfer-Pseudolegierungen, kann der Wolframgehalt reduziert und das Verfahren auf Schmelzinfiltration umgestellt werden. Zunächst wird das Wolframgerüst gesintert, wodurch gezielt Poren entstehen. Anschließend wird Kupfer infiltriert, um die Hohlräume zu füllen. Chemisch gesehen bildet die Kupferphase keine feste Lösung und bietet so einen Kanal mit hoher Wärmeleitfähigkeit. Die Sintertemperatur ist niedriger, und der Prozessablauf ist stärker auf Kaltwalzbarkeit ausgelegt. Dank der guten Plastizität von Kupfer lassen sich ultradünne Bleche ohne häufiges Glühen erzielen. Aktivierete Sinterverfahren sind bei Blechen mit geringer Dichte üblich. Dabei fördern Additive die Verdichtung bei niedrigen Temperaturen und eignen sich für Wolfram- Silber- oder Verbundsysteme. Unterschiede bestehen auch in der Oberflächenbehandlung: Bleche mit hoher Dichte werden oft vernickelt, um die Bindemittelphase zu schützen, während Bleche mit geringer Dichte direkt die Korrosionsbeständigkeit von Kupfer nutzen.

Darüber hinaus beeinflussen Prozessunterschiede den Energieverbrauch und die Ausbeute. Hochdichteverfahren erfordern aufwendige Anlagen und haben lange Vorlaufzeiten, bieten aber eine stabile Leistung. Nicht-Hochdichteverfahren sind flexibler und eignen sich für die Herstellung funktionaler Wafer in kleinen Chargen. Die Einhaltung strengerer Reinheitsstandards ist bei Hochdichteverfahren erforderlich, da Verunreinigungen die Porosität leicht erhöhen können. Hinsichtlich der Umweltkontrolle benötigen Hochdichteverfahren hochreinen Wasserstoff, während bei Nicht-Hochdichteverfahren die Vakuumschmelzinfiltration zur Verhinderung von Oxidation eingesetzt wird.

### 6.1.3 Typischer Dickenbereich und entsprechende Prozessauswahl (0,05 mm bis 50 mm)

Wolframlegierungsbleche weisen typischerweise Dicken von 0,05 mm (ultradünne Folie) bis 50 mm (Platte) auf. Die Wahl des entsprechenden Verfahrens erfordert ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Verarbeitungsaufwand und Mikrostrukturkontrolle. Bei dünnen Blechen liegt der Fokus auf Präzisionswalzen, während bei dicken Blechen die Knüppelvorbereitung und das Schmieden im Vordergrund stehen. Im Bereich von 0,05 mm bis 0,5 mm ultradünnen Blechen ist das mehrstufige Kaltwalzen das primäre Verfahren, das eine hohe Gesamtausbeute ermöglicht. Durch eine leichte Erhöhung des Anteils der Binderphase werden die Duktilität verbessert und Kantenrisse vermieden. Häufig wird eine Zwischenglühung unter Hochvakuum durchgeführt, um Spannungen abzubauen, und Schmierstoffe werden eingesetzt, um Oberflächenbeschädigungen zu minimieren. Abschließend sorgt chemisches Polieren oder elektrolytisches Finish für eine glatte Oberfläche.

Das Verfahren ist am ausgereiftesten für Bleche mit einer Dicke von 0,5 mm bis 10 mm und umfasst das Warmwalzen sowie das Kaltwalzen. Beim Warmwalzen werden in jedem Walzstich große Umformgrade erreicht, gefolgt von Warmwalzübergängen und optimierten Glühprozessen, die zu einem faserigen Gefüge führen. Bei Blechen mit einer Dicke von 10 mm bis 50 mm konzentriert sich das Verfahren auf die Vorformung, gefolgt vom Warmschmieden oder Warmwalzen zu dünnen, großformatigen,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

kaltisostatisch gepressten Rohlingen. Eine Hochtemperatur-Schutzgasatmosphäre verhindert die Entkohlung, und die Bearbeitungsgeschwindigkeit ist geringer, um die Festigkeit zu erhalten. Die Oberfläche wird hauptsächlich durch Fräsen abgetragen, um die Oxidschicht zu entfernen.

Bei der Prozessauswahl spielen die Anlagenkapazitäten eine Rolle: Dünne Bleche erfordern hochpräzise Walzwerke und eine präzise Spannungsregelung, während dicke Bleche große Schmiedepressen benötigen. Chemische Prinzipien beeinflussen die Blechdicke: Dünne Bleche leiten Wärme schnell ab und weisen eine ausgeprägte Kaltverfestigung auf; dicke Bleche erfahren eine Akkumulation thermischer Effekte, was eine Temperaturgradientenkontrolle notwendig macht. Die Gewährleistung der Gleichmäßigkeit wird mit zunehmender Blechdicke schwieriger und erfordert daher bei dicken Blechen eine Mehrpunkt-Dichteprüfung. Auch Umweltfaktoren sind relevant: Dünne Bleche neigen zur Oxidation und müssen unter Schutzgasatmosphäre verpackt werden.

## 6.2 Herstellung des Rohmaterialpulvers

Die Aufbereitung des Rohmaterialpulvers ist ein grundlegender Schritt bei der Herstellung von Wolframlegierungsblechen und beeinflusst maßgeblich die Gleichmäßigkeit, Dichte und die endgültigen Eigenschaften des Sintermaterials. Diese Aufbereitung umfasst die Reduktion und Reinigung des Wolframpulvers, die Auswahl und Vorbehandlung der Legierungselementpulver sowie die Homogenisierung durch Mischen. Wolframpulver, als Hauptrohstoff, erfordert eine hohe Reinheit und eine geeignete Partikelgröße, um die Benetzung und Umlagerung während des Flüssigphasensinterns zu gewährleisten. Legierungselementpulver wie Nickel, Eisen und Kupfer bilden eine Bindemittelphase und müssen hinsichtlich Partikelgröße und Aktivität mit dem Wolframpulver übereinstimmen. Der Aufbereitungsprozess legt besonderen Wert auf die Kontrolle der chemischen Reinheit und der physikalischen Eigenschaften, um das Einbringen von Verunreinigungen in spröde Phasen oder Poren zu vermeiden. Ein typischer Prozess beginnt mit der Wasserstoffreduktion von Ammoniumwolframat, gefolgt von der Atomisierung des Legierungspulvers oder der Carbonylzersetzung. Anschließend erfolgt das Sieben und Mischen, um eine homogene Charge zu erzielen. Die Partikelgrößenverteilung und die Siebanalyse nach Fisher sind wichtige Qualitätskontrollpunkte, um die Fließfähigkeit des Pulvers und die Pressleistung sicherzustellen.

Das chemische Prinzip der Herstellung beruht auf Reduktionsreaktionen und der Regulierung der Oberflächenenergie. Hochreiner Wasserstoff dient der Reduktion und Entfernung von Sauerstoff, und das Legierungspulver wird vorbehandelt, um Oxidation zu verhindern. Moderne Verfahren nutzen Sprühtrocknung oder mechanisches Legieren, um die Mischeffizienz zu verbessern und das Mikrogefüge zu verfeinern. Aufgrund von Umwelteinflüssen muss das Pulver in einer trockenen, inerten Atmosphäre gelagert werden, um Feuchtigkeitsaufnahme zu vermeiden.

### 6.2.1 Herstellung und Qualitätsanforderungen an hochreines Wolframpulver

Die Herstellung von hochreinem Wolframpulver erfolgt hauptsächlich durch Wasserstoffreduktion von Ammoniumwolframat oder Wolframoxid. Dieses Verfahren ermöglicht durch mehrstufige Reduktion

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eine hohe Reinheit und Partikelgrößenkontrolle des Wolframs und gewährleistet so die Aktivität und Reinheit des Pulvers beim Sintern der Legierungsbleche. Der Herstellungsprozess beginnt mit der Auflösung und Rekristallisation von Ammoniumwolframat, gefolgt von der Kalzinierung zu gelbem Wolfram oder blauem Wolframoxid. Anschließend wird dieses in einem Rohr- oder Schubbooten stufenweise mit Wasserstoff reduziert. In der ersten Stufe erfolgt die Reduktion bei niedriger Temperatur zur Entfernung von Kristallwasser und einem Teil des Sauerstoffs, während in der zweiten Stufe die Reduktion bei hoher Temperatur metallisches Wolframpulver erzeugt. Chemisch gesehen reagiert  $\text{WO}_3$  mit  $\text{H}_2$  zu  $\text{W}$  und  $\text{H}_2\text{O}$ . Der Wasserdampf wird durch Taupunktkontrolle schnell entfernt, um eine Reoxidation des Wolframpulvers zu verhindern. Prozessparameter wie die Drehzahl des Schubboots, der Wasserstoffdurchfluss und der Temperaturgradient regulieren die Pulverpartikelgröße; niedrigere Temperaturen und geringere Drehzahlen begünstigen die Bildung von feinerem Pulver.

Die Qualitätsanforderungen konzentrieren sich auf Reinheit, Partikelgröße und Morphologie. Für eine hohe Reinheit sind ein niedriger Sauerstoffgehalt sowie Spuren von Alkalimetallen und Phosphor/Schwefel erforderlich, um Sinterfehler zu vermeiden. Die Partikelgröße wird typischerweise nach der Fischer-Methode bestimmt; feines Pulver fördert die Verdichtung, während grobes Pulver für Festigkeit sorgt. Die Morphologie erfordert nahezu kugelförmige oder polyedrische Partikel mit sauberen, agglomerierten Oberflächen, um Mischbarkeit und Fließfähigkeit zu gewährleisten. Die Prüfung umfasst die chemische Analyse von Verunreinigungen, die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Morphologie und die Laser-Partikelgrößenverteilungsanalyse. Bei der Herstellung wird das Rohmaterial Ammoniumwolframat mehrfach umkristallisiert, um Natrium und Calcium zu entfernen, und anschließend mit hochreinem Wasserstoff getrocknet. Varianten wie Plasmareduktion oder Zinkschmelze werden zur Wolframgewinnung eingesetzt, wodurch die Reinheit weiter verbessert wird.

Die Qualitätsanforderungen an dieses Präparat hängen von der Anwendung des Legierungsblechs ab. Medizinische Abschirmbleche erfordern extrem geringe Verunreinigungen, um Streustrahlung zu vermeiden, während industrielle, verschleißfeste Bleche etwas gröbere Körner zulassen, um die Härte zu erhöhen. Die Lagerung erfordert Vakuum- oder Schutzgasverpackung, um Feuchtigkeit und Oxidation zu verhindern. Chemische Stabilität ist eine zentrale Anforderung; das Pulver neigt an der Luft zur Passivierung und bildet eine dünne Oxidschicht, die die Benetzbarkeit beeinträchtigt und daher eine Vorreduktionsaktivierung notwendig macht.

### 6.2.2 Auswahl und Vorbehandlung von Legierungselementpulvern (Ni, Fe, Cu, Co, Mo usw.)

Legierungselementpulver wie Nickel, Eisen, Kupfer, Kobalt und Molybdän sind für die Herstellung von Wolframlegierungsblechen unerlässlich. Die Elementauswahl basiert auf der Benetzbarkeit im Phasendiagramm und der funktionalen Übereinstimmung. Die Vorbehandlung gewährleistet die Aktivität und Reinheit des Pulvers und verhindert ungleichmäßiges Sintern. Nickelpulver wird üblicherweise durch Carbonylzersetzung hergestellt, was zu einer feinen Partikelgröße, hoher Aktivität und guter Duktilität führt. Eisenpulver wird durch Elektrolyse oder Reduktion gewonnen und bietet moderate magnetische Eigenschaften zur besseren Vermischung. Kupferpulver wird durch Atomisierung oder Elektrolyse hergestellt und bietet eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit für nichtmagnetische

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Systeme. Kobaltpulver verstärkt die Bindemittelphase, und Molybdänpulver ersetzt Wolfram teilweise, um die Ausdehnung zu regulieren. Zu den Auswahlkriterien gehören hohe Reinheit, niedriger Sauerstoffgehalt und eine mit dem Wolframpulver übereinstimmende Partikelgröße, typischerweise mit ähnlichen Fisher-Partikelgrößen, um Entmischung zu vermeiden.

Die Vorbehandlung umfasst die Wasserstoffreduktion zur Entfernung der Oberflächenoxidschicht. Chemisch reagiert  $H_2$  mit den Oxiden zu Wasser, das anschließend abgeführt wird und den Benetzungswinkel erhöht. Durch Vakuumentgasung werden gasförmige Verunreinigungen weiter reduziert, und Sieben entfernt Agglomerate und Fremdkörper. Durch Kugelmahlen oder mechanische Aktivierung werden bestimmte Elemente, wie z. B. vorgemischtes Nickel-Eisen, vorlegiert, um ein Mischkristallpulver zu bilden und die Homogenität zu verbessern. Die Verarbeitungstemperatur wird sorgfältig kontrolliert, um ein Sintern des Pulvers zu vermeiden. Chemische Reinigung, wie z. B. Säurewäsche, entfernt Ölflecken. Wolframlegierungspulver werden jedoch häufig trocken behandelt, um Korrosion zu verhindern.

Die Unterschiede in der Materialauswahl und -vorbehandlung spiegeln die Systemanforderungen wider: Eisenpulver im Nickel-Eisen-System muss rostgeschützt werden, während Kupferpulver im Nickel-Kupfer-System eine hohe Oxidationsbeständigkeit aufweisen muss. Für die Zerstäubung wird hochreines Molybdänpulver ausgewählt, um die Dichte von Wolfram zu erreichen. Die Qualitätsprüfung umfasst die chemische Analyse von Sauerstoff, Kohlenstoff und der Partikelgrößenverteilung.

### 6.2.3 Kontrolle der Pulverpartikelgrößenverteilung und Fisher-Partikelgrößenbestimmung

wichtigsten Qualitätskontrollmethoden bei der Aufbereitung von Rohmaterialien für Wolframlegierungsbleche sind : Die Optimierung der Partikelgrößenverteilung wird durch Anpassung der Reduktionsparameter und Siebung erreicht. Die Fisher-Methode liefert eine mittlere Partikelgrößenbestimmung zur Sicherstellung der Press- und Sinterleistung. Die Kontrolle der Partikelgrößenverteilung spiegelt sich in der Reduktion des Wolframpulvers wider: Hohe Temperaturen und hohe Rührgeschwindigkeiten führen zu grobem, niedrige Temperaturen und niedrige Geschwindigkeiten hingegen zu feinem Pulver. Chemisch beeinflusst die Reduktionskinetik das Kristallkeimwachstum. Durch Anpassung der Wasserstoffdurchflussrate und der Wasserdampfkonzentration wird eine unnatürliche Vergröberung verhindert. Die Zerstäubung oder das Mahlen des Legierungspulvers steuert die Verengung der Verteilung und vermeidet so Agglomeration durch extrem feines Pulver oder Porosität durch grobes Pulver. Laser-Partikelgrößenanalysatoren oder Siebverfahren überwachen die Verteilungskurve. Idealerweise sollte diese logarithmisch-normalverteilt sein, wobei eine breite Verteilung die Verengung und Verdichtung begünstigt.

Die Fisher-Partikelgrößenverteilung basiert auf dem Prinzip der Luftdurchlässigkeit. Der Schichtwiderstand des Pulvers spiegelt die mittlere Partikelgröße wider, und die chemische Oberflächenadsorption von Gasen beeinflusst die Durchlässigkeit. Unter Standardbedingungen ist die Reproduzierbarkeit jedoch gut. Die Testprobe wird getrocknet und gleichmäßig gepackt, und der Siebdurchmesser wird anhand der Druckdifferenz berechnet. Das Verfahren ist einfach und schnell,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



eignet sich zur Produktionskontrolle und deckt einen typischen Bereich von Wolframpulver von fein bis grob ab, um den Anforderungen an die Schichtdicke gerecht zu werden. Die Kontrolle erfolgt in Kombination mit Mischanpassungen; feines Wolframpulver wird mit grobem Legierungspulver gemischt, um den Fließprozess zu optimieren.

Diese Kontrolle und Detektion hängt mit der Gleichmäßigkeit des Endprodukts zusammen; eine enge Verteilung ist vorteilhaft für fehlerfreie Dünobleche, während eine breite Verteilung zu dicken Blechen mit hoher Festigkeit führt. Die chemische Reinheit beeinflusst die Detektion; hohe Sauerstoffkonzentrationen und Pulveragglomeration führen zu höheren Messwerten. Die Kontrolle der Umgebungsfeuchtigkeit ist entscheidend, um die Wasseraufnahme der Probe zu verhindern.

#### 6.2.4 Pulvermisch- und Legierungsverfahren

Pulvermischen und Legieren sind Homogenisierungsschritte bei der Herstellung von Wolframlegierungsblechen. Eine gleichmäßige Elementverteilung wird durch mechanisches Mischen, Kugelmahlen oder Sprühtrocknung erreicht, um Sintersegregationen zu vermeiden. Beim mechanischen Mischen werden üblicherweise V- oder Doppelkegelmischer mit niedriger Drehzahl eingesetzt, um eine Entmischung zu verhindern. Chemisch beeinflussen elektrostatische oder Van-der-Waals-Kräfte an der Pulveroberfläche die Homogenität, und Additive wie Alkohol unterstützen die Dispersion. Die Mischzeit kann auf mehrere Stunden verlängert werden, um eine gleichmäßige Durchmischung zu gewährleisten. Beim Legieren durch Kugelmahlen wird eine Hochenergie-Kugelmühle eingesetzt, bei der der Aufprall mechanochemische Reaktionen auslöst, wodurch einige Elemente vorlegiert, die Partikelgröße verfeinert und die Aktivität verbessert wird. Allerdings ist eine Schutzgasatmosphäre erforderlich, um Oxidation zu verhindern.

Die Sprühtrocknung zerstäubt und trocknet eine Pulversuspension zu sphärischen Partikeln, die temporär mit einem chemischen Bindemittel gebunden werden, um Fließfähigkeit und Kompressibilität zu verbessern. Der Vorteil des Verfahrens liegt in der Homogenität des resultierenden Pulvers, wodurch es sich für die Massenproduktion eignet. Nach dem Mischen werden Proben für chemische Analysen oder Elektronenmikroskopie entnommen, um die Verteilung zu überprüfen; Homogenität wird durch geringe Abweichungen der Elemente definiert.

Die Unterschiede dieser Methoden spiegeln den Produktionsmaßstab wider: Mechanisches Mischen ist einfach und kostengünstig, Kugelmahlen eignet sich zur Verfeinerung von Mikrostrukturen, und Sprühtrocknung erzielt eine hohe Qualitätshomogenität. Die chemischen Prinzipien umfassen Diffusion und Adsorption, und Mischen fördert den Oberflächenkontakt. Die Lagerung ist entscheidend, um Entmischung zu verhindern, und Vibrationen sollten vermieden werden.

#### 6.3 Pulverformverfahren

Das Pulverformen ist ein entscheidender Schritt in der Herstellung von Wolframlegierungsblechen und verbindet Rohpulver mit Sinterrohlingen. Durch Druck oder den Einsatz von Hilfsstoffen wird loses

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pulver in Grünlinge mit spezifischer Form, Festigkeit und Dichte umgewandelt. Dieser Prozess beeinflusst direkt die Gleichmäßigkeit der Schrumpfung beim anschließenden Sintern und die Konsistenz des Mikrogefüges des Endprodukts. Zu den Formgebungsverfahren gehören Kaltisostatisches Pressen, Formpressen und Spritzgießen. Die Wahl des Verfahrens hängt von den Pulvereigenschaften, der Rohlingsgröße und der gewünschten Dicke ab. Wolframlegierungspulver weisen eine geringe Fließfähigkeit und Kompressibilität auf, weshalb die hohe Dichte von Wolfram und die Benetzungswirkung der Bindemittelphase beim Formen berücksichtigt werden müssen. Die Prozessprinzipien umfassen Partikelumlagerung, plastische Verformung und Reibungseffekte; die Gleichmäßigkeit der Druckverteilung bestimmt den Dichtegradienten des Grünlings. Eine ausreichende Festigkeit des Grünlings ist notwendig, um die Handhabung und das Entbindern zu ermöglichen und Risse oder Verformungen zu vermeiden. Chemische Zusätze wie Paraffin oder Polymere verstärken die Bindung vorübergehend und werden anschließend entfernt.

In den letzten Jahren lag der Fokus der Optimierung von Formgebungsprozessen auf Nachhaltigkeit und Automatisierung. Kaltisostatisches Pressen eignet sich für großformatige Rohlinge, Formpressen für kleine und mittelgroße Teile, und Spritzgießen wurde auf komplex geformte, dünne Rohlinge ausgeweitet. Die Kontrolle der Umgebungsbedingungen, wie z. B. eine trockene Atmosphäre zur Vermeidung von Pulveroxidation und eine langsame Druckentlastung zur Vermeidung von Rückfederung, ist entscheidend. Die Dichte des Grünlings nach dem Formgebungsprozess liegt üblicherweise in einem bestimmten Prozentsatz des theoretischen Wertes, und durch Optimierung lassen sich Unterschiede in der Sinterschrumpfung reduzieren. Die Fehlerkontrolle konzentriert sich auf Delamination und Dichteinhomogenität, die durch die Anpassung von Prozessparametern minimiert werden.

### 6.3.1 Kaltisostatisches Pressen

Kaltisostatisches Pressen (COP) ist ein Verfahren zur Herstellung von Blechzuschnitten aus Wolframlegierungen. Dabei wird ein flüssiges Medium verwendet, um gleichmäßigen Druck zu übertragen und das Pulver in eine flexible Form zu pressen, wodurch ein hochdichter Rohling entsteht. Dieses Verfahren eignet sich für große oder komplex geformte Rohlinge, da es eine isotrope Druckverteilung gewährleistet. Der Prozess umfasst das Befüllen einer Gummi- oder Kunststoffform mit dem Pulvergemisch, das Verschließen der Form und das Einbringen in einen Hochdruckbehälter. Wasser oder Öl dient als Druckübertragungsmedium, und der Druck wird schrittweise auf das gewünschte Niveau erhöht. Nach einer gewissen Druckdauer wird der Rohling drucklos gemacht und entnommen. Chemisch gesehen fördert der gleichmäßige Druck eine kompakte Anordnung der Partikel und reduziert so die durch Reibung verursachten Dichtegradienten. Die hohe Härte des Wolframpulvers füllt unter isostatischer Pressung effektiv die entstandenen Lücken, und das Bindemittelpulver unterstützt die koordinierte Verformung.

Die Vorteile dieses Formverfahrens liegen in der gleichmäßigen Dichteverteilung des Grünlings. Dadurch eignet er sich ideal für das anschließende Blechwalzen und vermeidet die bei Formgebungsverfahren häufig auftretenden Bereiche geringer Dichte an den Rändern. Die flexible

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Werkzeugkonstruktion ermöglicht die Herstellung zylindrischer, plattenförmiger oder unregelmäßig geformter Rohlinge. Die Zugabe einer geringen Menge Schmiermittel verbessert den Füllfluss. Eine langsame Druckentlastung verhindert Mikrorisse durch elastische Rückfederung. Die Festigkeit des Grünlings wird durch die Anpassung der Pulverpartikelgröße erhöht; feinere Pulver bieten gute Fülleigenschaften, erfordern jedoch Schutz vor Agglomeration. Die Optimierung der Prozessparameter umfasst die Druckbeaufschlagungsrate und die Haltezeit; längere Haltezeiten begünstigen das Verkleben der Partikel.

Dieses Umformverfahren findet breite Anwendung bei der Herstellung von hochdichten Wolframlegierungsblechen. Große Rohlinge werden nach dem Kaltisostatpressen mit hoher Effizienz warmgewalzt. Die Einhaltung der chemischen Reinheit ist entscheidend; ein sauberes Medium ist unerlässlich, um Verunreinigungen zu vermeiden. Die Oberfläche des Rohlings ist nach dem Entformen glatt, wodurch die nachfolgenden Bearbeitungszugaben reduziert werden. Varianten wie das Trockenbeutelverfahren vereinfachen die Arbeitsabläufe, während das Nassbeutelverfahren mehr Flexibilität bietet. Aus Umweltgründen senkt das Recycling der Formmaterialien die Kosten.

### 6.3.2 Formpressen und Optimierung der Druckparameter

Formpressen und die Optimierung der Druckparameter sind traditionelle Verfahren zur Herstellung kleiner Rohlinge aus Wolframlegierungsblechen. Dabei wird Pulver durch unidirektionalen oder bidirektionalen Druck in einer Stahlform in Form gepresst. Die einfache Ausrüstung macht das Verfahren geeignet für die Massenproduktion. Die Optimierung konzentriert sich auf die Druckverteilung und ein reibungsloses Entformen. Der Prozess beinhaltet das Befüllen einer Hartform mit Pulver, das anschließende Pressen mit einer Hydraulikpresse und die dadurch bedingte Neuordnung und Verformung der Partikel unter Reibung an der Formwand, wodurch ein Grünling entsteht. Chemisch gesehen ist Wolframpulver nur begrenzt kompressibel; die Zugabe temporärer Bindemittel wie Paraffinwachs verstärkt die Bindung zwischen den Partikeln und verbessert die Festigkeit des Grünlings. Bei unidirektionaler Kompression muss die Formwand geschmiert werden, um die Reibung zu reduzieren, während bidirektionale Kompression die Dichtehomogenität verbessert.

Die Optimierung der Druckparameter umfasst die Belastungsgröße, die Druckaufbaurate und die Haltezeit. Hoher Druck erhöht die Dichte, begünstigt jedoch Delamination, während niedriger Druck zu mehr Porosität führt. Die Optimierung erfolgt experimentell durch schrittweise Druckaufbau, um Spannungskonzentrationen zu vermeiden. Trennmittel wie Zinkstearat-Beschichtungen reduzieren die Reibung und verhindern Anhaften. Dichtegradienten im Grünzustand werden durch schwimmende Matrizen oder Mehrstempelkonstruktionen minimiert.

Wolframlegierungsblechrohlinge in Standarddicke werden anschließend geschmiedet oder gewalzt, um kleinere Rohlinge zu erhalten. Optimierte Mischungsverhältnisse der chemischen Zusätze gewährleisten ein ausgewogenes Verhältnis von Festigkeit und gründlicher Entfettung. Eine kontrollierte, schrittweise Druckentlastung reduziert die Rissbildung durch Rückfederung. Verfahren wie das Warmpressen verbessern die Fließfähigkeit, Wolframlegierungen werden jedoch üblicherweise bei Raumtemperatur

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verarbeitet. Die Klimatisierung sorgt dafür, dass das Pulver trocken bleibt und keine Feuchtigkeit aufgenommen wird.

### 6.3.3 Anwendung des Spritzgießens bei dünnen Blechvorformlingen

Spritzgießen wird zur Herstellung dünner Blechvorformlinge eingesetzt. Wolframlegierungspulver wird mit einem organischen Bindemittel zu einem Rohmaterial vermischt, das anschließend unter hohem Druck in eine Form eingespritzt wird, um komplexe oder dünnwandige Grünlinge zu formen. Dieses Verfahren erweitert die Formfreiheit der Pulvermetallurgie und eignet sich für die präzise Herstellung dünner Blechvorformlinge. Der Prozess beginnt mit der Aufbereitung des Rohmaterials. Das Pulver wird bei hoher Temperatur mit einem Bindemittel auf Wachs- oder Polymerbasis vermischt. Das Bindemittel umhüllt die Partikel chemisch und verbessert so die Fließfähigkeit. Nach der Granulierung wird das Rohmaterial in eine beheizte Form eingespritzt, wo es durch Druck den Formhohlraum ausfüllt. Abkühlen und Erstarren führen zum Entformen des Rohlings. Chemische Entfettung entfernt das Bindemittel, während Lösungsmittel- oder thermische Entfettung organische Bestandteile zersetzt. Zurück bleibt ein poröser Vorformling, der anschließend gesintert wird, um die gewünschte Dichte zu erreichen.

Die Vorteile dieser Anwendung liegen in der endkontumahren Formgebung, der gleichmäßigen Dicke des Dünnblechzuschnitts und der glatten Oberfläche, wodurch der Bearbeitungsaufwand reduziert wird. Bei hohem Wolframgehalt ist eine optimierte Viskosität erforderlich, um Entmischungen zu vermeiden. Spritzgießparameter wie Temperatur und Druck müssen auf die Pulvereigenschaften abgestimmt sein, und eine präzise Werkzeugkonstruktion ist für die Kontrolle der Wandstärke unerlässlich.

Diese Anwendung birgt großes Potenzial für ultradünne Wolframlegierungsblech- Vorformlinge und ermöglicht die Herstellung komplexer Formen wie beispielsweise perforierter Bleche. Das chemische Bindemittel wird mit niedrigem Restkohlenstoffgehalt ausgewählt, um Karbidversprödung zu verhindern. Langsames Entbindern beugt Blasenbildung und Rissbildung vor. Die anschließende Sinterungsschrumpfung ist kontrollierbar. Das Bindemittel ist umweltgerecht recycelbar und trägt somit zur Reduzierung der Umweltbelastung bei.

### 6.3.4 Grünkörperfestigkeitsverbesserung und Entfettungsprozess

Die Verbesserung der Grünkörperfestigkeit und das Entbindern sind entscheidende Nachbearbeitungsprozesse. Die Grünkörperfestigkeit wird durch Additive oder Vorsintern erhöht, während das Entbindern temporäre Bindemittel entfernt, um ein fehlerfreies nachfolgendes Sintern zu gewährleisten. Zu den Methoden der Festigkeitssteigerung gehören die Erhöhung des Bindemittelanteils oder das Vorsintern bei niedriger Temperatur, die chemische Überbrückung von Bindemittelpartikeln und eine leichte Diffusion während des Vorsinterns zur Bildung von Halsverbindungen. Die Festigkeit des spritzgegossenen Grünkörpers ist druckabhängig, während spritzgegossene Rohmaterialien eine hohe Eigenfestigkeit aufweisen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Entfettungsprozesse werden in Lösungsmittel- und thermische Entfettung unterteilt. Bei der Lösungsmittelentfettung wird das Material in ein organisches Lösungsmittel getaucht, um die Wachsbasis aufzulösen, während bei der thermischen Entfettung das Polymer durch Erhitzen zersetzt wird. Die chemische Steuerung der Heizrate verhindert schnelles Verdampfen und Blasenbildung. Ein kombiniertes Entfettungsverfahren, bestehend aus Lösungsmittel- und anschließender Wärmebehandlung, ist hocheffizient und hinterlässt geringe Rückstände. Optimierte Prozessparameter verhindern Rissbildung, und Stützmaterialien erleichtern die Vorbereitung des Rohlings. Dieser Prozess ist besonders wichtig bei spritzgegossenen Rohlingen; eine gründliche Entfettung beeinflusst die Sinterreinheit. Es muss ein Gleichgewicht zwischen Festigkeitssteigerung und Entfettung gefunden werden; zu starke Bindungen erschweren die Entfettung. Die chemische Analyse des Restkohlenstoffs überwacht den Entfettungseffekt. Lösungsmittel werden durch umweltgerechte Abgasreinigung zurückgewonnen.

#### 6.4 Sinterprozess

Sintern ist der Kernschritt bei der Herstellung von Wolframlegierungsblechen. Durch Hochtemperaturbehandlung wird der Grünling in ein hochdichtes Massivmaterial umgewandelt, wodurch Poren beseitigt und ein stabiles Zweiphasengefüge ausgebildet wird. Dieser Prozess bestimmt direkt die Dichte, die Phasenverteilung und die Grenzflächenhaftung des Materials. Zu den Sinterverfahren zählen das vertikale Sintern in Wasserstoffatmosphäre, das Vakuumsintern und das integrierte Sintern mit anschließendem Heißisostatischem Pressen (HIP). Das Wasserstoffsintern eignet sich für traditionelle Flüssigphasensysteme, das Vakuumsintern konzentriert sich auf die Kontrolle von Verunreinigungen, und integrierte Verfahren verbessern die Qualität komplexer Rohlinge. Die Prozessprinzipien umfassen Festphasendiffusion, Flüssigphasenumlagerung und Lösungs-Wiederfällungs-Mechanismen. Unter Benetzung durch die Binderphase sphäroidisieren die Wolframpartikel, wodurch die chemische Grenzflächenbindung verstärkt wird. Temperatur, Atmosphäre und Halteparameter müssen präzise auf das Legierungssystem abgestimmt sein, um Übersintern (Vergröberung) oder Untersintern (Porosität) zu vermeiden.

In den letzten Jahren wurden zur Optimierung des Sinterprozesses kontinuierliche Öfen und intelligente Steuerungssysteme eingesetzt, um die Gleichmäßigkeit und Energieeffizienz zu verbessern. Die chemische Atmosphäre spielt dabei eine wichtige Rolle: Wasserstoff reduziert Oxide, und Vakuum entfernt flüchtige Verunreinigungen. Die Art der Knüppelbeladung beeinflusst das Temperaturfeld; vertikale Hänge- oder Schiffsbeladung verringert die Verformung. Die Abkühlgeschwindigkeit reguliert die Ausscheidungen, wobei langsames Abkühlen die Gleichmäßigkeit fördert. Die Vermeidung von Defekten konzentriert sich auf Blasenbildung und Rissbildung, die durch Vorentgasung und Gradientenerwärmung minimiert werden.

##### 6.4.1 Vertikales Sinterverfahren in Wasserstoffatmosphäre

Das vertikale Sintern in Wasserstoffatmosphäre ist ein klassisches Verfahren zur Verdichtung von Wolframlegierungsblechen. Durch Erhitzen in einem wasserstoffgeschützten Ofen unter einem

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Molybdänschiffchen oder im hängenden Zustand wird eine Flüssigphasensinterung und die Reduzierung von Verunreinigungen erreicht. Diese Technologie eignet sich für die Massenproduktion von Nickel-Eisen- und Nickel-Kupfer-Systemen. Dabei wird der Rohling vertikal oder in einem Schiffchen platziert und kontinuierlich mit Wasserstoff beaufschlagt. Die Temperatur wird über die Liquidustemperatur erhöht und gehalten, sodass die Reduktionsreaktion Oberflächenoxide entfernt, während Wasserdampf mit dem Gasstrom abgeführt wird. Chemisch reagiert Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser, wodurch der Rohling sauber bleibt, die Benetzung der Wolframpartikel durch die Bindemittelphase gefördert und die Umlagerung und Verdichtung erleichtert wird. Die vertikale Anordnung reduziert den Kontakt zwischen Rohling und Schiffchen und verhindert so Anhaften und lokale Verunreinigungen.

Der technologische Vorteil liegt in der doppelten Wirkung der reduzierenden Atmosphäre: Sie verringert Verunreinigungen und schützt gleichzeitig vor Wolframoxidation und -verflüchtigung. Zum Einsatz kommen meist kontinuierliche Schubboot- oder Glockenöfen. Erstere ermöglichen einen hohen Automatisierungsgrad, letztere sorgen für eine gleichmäßigere Temperaturverteilung. Die Heizkurve ist segmentiert: Durch Entgasung bei niedriger Temperatur wird restliches Bindemittel entfernt, anschließend findet Diffusion in der mittleren Phase statt, und schließlich erfolgt die Haltephase in der flüssigen Phase bei hoher Temperatur. Während dieser Haltephase kugeln sich die Wolframpartikel aus, und der Lösungs-Wiederfällungs-Mechanismus verfeinert die Grenzfläche. Die Abkühlung erfolgt kontrolliert in Wasserstoff, um Spannungsrisskorrosion zu vermeiden.

Diese Technologie wird ausgereift beim Sintern von hochdichten Wolframlegierungsblechen eingesetzt. Die präzise Steuerung des Wasserstofftaupunkts gewährleistet eine ausreichende Reduktion bei niedrigen Taupunkten und verhindert eine Überreduktion bei hohen Taupunkten. Optimierte Blockabstände sorgen für einen gleichmäßigen Luftstrom und reduzieren Temperaturgradienten. Die chemische Reinheit wird durch mehrstufige Wasserstofffiltration verbessert. Varianten wie die Nasswasserstoffbehandlung regulieren die Feuchtigkeit und fördern die Sauerstoffentfernung. Eine umweltgerechte Abgasbehandlung neutralisiert die Restfeuchte.

#### 6.4.2 Kontrolle des Temperaturfensters und der Haltezeit beim Flüssigphasensintern

Die Kontrolle des Temperaturfensters und der Haltezeit beim Flüssigphasensintern ist ein zentraler Parameter beim Sinterprozess von Wolframlegierungsblechen. Sie beeinflusst direkt die Menge der flüssigen Phase, die Partikelumlagerung und die Mikrostrukturentwicklung. Diese Kontrolle gewährleistet eine ausreichende Verdichtung und verhindert gleichzeitig unnatürliches Wachstum. Das Temperaturfenster liegt oberhalb des Schmelzpunktes der Bindemittelphase. Nach dem Auftreten der flüssigen Phase fließt eine geeignete Menge davon und benetzt die Wolframpartikel. Die reduzierte Oberflächenenergie auf chemischer Ebene führt zur Umlagerung, wodurch kleine Partikel aufgelöst und auf der Oberfläche größerer Partikel ausgefällt werden. Ein zu enges Temperaturfenster führt zu einer unzureichenden flüssigen Phase und, falls zu niedrig, zu einer geringen Dichte. Eine zu hohe flüssige Phase hingegen kann zum Kollaps des Grünlings oder zur Entmischung führen. Das Temperaturfenster ist in Nickel-Eisen-Systemen größer und in Nickel-Kupfer-Systemen kleiner, weshalb eine Anpassung anhand des Phasendiagramms erforderlich ist.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Haltezeit steuert den Reaktionsgrad in der flüssigen Phase; kurze Haltezeiten werden von Umlagerungen dominiert, lange Haltezeiten hingegen von Lösungs- und Wiederausfällungsprozessen sowie Sphäroidisierung. Die optimale Haltezeit wurde experimentell ermittelt, wobei in der Anfangsphase eine schnelle Verdichtung und in der späteren Phase eine langsame Verfeinerung stattfand. Die Aufheizrate beeinflusst den Eintrittspunkt in das Reaktionsfenster; eine langsame Aufheizrate verhindert lokale Überhitzung. Die Atmosphärenkontrolle wird ergänzend eingesetzt; ein Wasserstoffstrom transportiert flüchtige Bestandteile ab und gewährleistet so die Stabilität des Reaktionsfensters.

Die Steuerung variiert je nach Knüppeldicke; größere Knüppel benötigen ein kleineres Wärmefenster, um Verformungen zu vermeiden, während kleinere Knüppel eine längere Wärmespeicherung zur Förderung der Gleichmäßigkeit ermöglichen. Chemische Zusätze wie Kobalt erweitern das Wärmefenster und verbessern die Fließfähigkeit. Die Überwachung erfolgt durch Mehrpunkt-Temperaturmessung mit Thermoelementen, um eine konstante Temperatur im Ofen zu gewährleisten. Die Abkühlung erfolgt langsam und durchläuft das Wärmefenster, um das Mikrogefüge zu fixieren. Zu den Varianten gehört die segmentierte Wärmespeicherung mit einer Hoch-zu-Tief-Phase zur Optimierung der Wärmespeicherung. Umweltfreundliches Energiemanagement verkürzt die Wärmespeicherzeit.

#### 6.4.3 Integriertes Vakuumsintern und Sintern-Heißisostatisches Pressen

Vakuumsintern und Sintern mit anschließendem Heißisostatischem Pressen (HIP) sind fortschrittliche Verfahren zur Herstellung hochwertiger Wolframlegierungs-Blechblöcke. Beim Vakuumsintern werden gasförmige Verunreinigungen durch Hochvakuum entfernt, während beim HIP-Verfahren Sintern mit Druckverdichtung kombiniert wird, wodurch die Qualität komplexer oder besonders anspruchsvoller Blechblöcke verbessert wird. Dieses Verfahren eignet sich für Wolfram-Kupfer-Pseudolegierungen oder hochreine Systeme. Beim Vakuumsintern wird in einem Vakuumofen erhitzt, wobei der Unterdruck Porengase und flüchtige Verunreinigungen entfernt, Wasserstoffrückstände chemisch verhindert, die Reinheit der Grenzflächen erhalten und die Diffusion in der festen oder schwach flüssigen Phase gefördert wird. Die Temperatur ist höher als beim herkömmlichen Sintern, um den fehlenden Flüssigkeitsstrom auszugleichen.

Das integrierte Sinter-Heißisostatische Pressen (HIP) erfolgt in einer einzigen Anlage. Zunächst wird eine Vakuumsinter-Vorverdichtung durchgeführt, gefolgt vom Argon-gefüllten, druckbeaufschlagten Heißisostatischen Pressen (HIP). Dadurch wird ein gleichmäßiger Druck in alle Richtungen gewährleistet und geschlossene Poren werden vermieden. Chemisch gesehen beschleunigen hohe Temperatur und hoher Druck die Diffusion, was zu einem engen Kontakt zwischen den Wolframpartikeln und einer verbesserten Grenzflächenhaftung führt. Der Vorteil des Verfahrens liegt in der reduzierten Kontamination durch die Beladung eines einzigen Ofens. Es eignet sich sowohl für ummantelte als auch für nicht ummantelte Rohlinge. Dieses Verfahren bietet großes Potenzial für die Vorbehandlung ultradünner Blechrohlinge und reduziert Zwischenfehler durch die Integration. Das Vakuummanagement ist entscheidend; ein niedriges Vakuum verhindert Verdampfungsverluste.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Temperatur- und Druckkurven sind gekoppelt, wobei das Sintern der Druckbeaufschlagung vorausgeht. Die hohe chemische Reinheit macht es geeignet für mit Seltenerden dotierte Legierungen. Langsame Abkühlung unter Vakuum vermeidet Spannungen. Eine Variante umfasst das Schnell-Heißpressen. Die Rückführung des Öls der Vakuumpumpe erfolgt umweltfreundlich.

#### 6.4.4 Sinterverformungskontrolle und Konstruktion von Stützwerkzeugen

Die Kontrolle der Sinterverformung und die Auslegung der Stützvorrichtung sind entscheidende Aspekte des Sinterprozesses von Wolframlegierungsblechen. Durch geeignete Stützung und Anpassung der Prozessparameter lassen sich gravitative Verformungen und durch die Erweichung bei hohen Temperaturen verursachte Verwerfungen reduzieren. Dies gewährleistet Maßgenauigkeit und ein gleichmäßiges Mikrogefüge des Blechs. Das Auftreten der flüssigen Phase während des Sinterns verringert die Festigkeit des Blechs, und die Schwerkraft kann leicht zu Einsinken oder Verbiegen führen. Chemisch gesehen verstärkt das Fließen der Bindemittelphase die Verformung. Die Kontrolle muss daher bereits bei der Wahl der Stützmethode und der Ofenbeladung beginnen. Hochreine Aluminiumoxid- oder Molybdänplatten werden häufig für die Stützvorrichtung verwendet, da sie hochtemperaturbeständig sind und sich nicht verformen. Oberflächenbeschichtungen verhindern das Anhaften von Fremdkörpern, und chemische Beschichtungen wie Bornitrid reduzieren Reibung und Reaktionen.

Es stehen verschiedene Werkzeugoptionen zur Verfügung. Flache Rohlinge werden durch Mehrpunktlagerung oder Sandbettfüllung fixiert, wobei die Sandpartikel Spannungen verteilen. Hochreiner Quarzsand zeichnet sich durch gute chemische Inertheit aus. Für lange Rohlinge eignet sich die vertikale Aufhängung, bei der Klemmen beide Enden fixieren, um ein Durchbiegen zu verhindern. Die Konstruktion berücksichtigt die Wärmeausdehnung, um Spannungsrisse zu vermeiden. Die Verformungskontrolle umfasst zudem langsame Aufheizraten, gründliches Entgasen bei niedrigen Temperaturen und kurze Haltezeiten in der flüssigen Phase, um die Fließzeit zu verkürzen. Auch die Rohlingslage wird optimiert, beispielsweise durch Neigen zum Ausgleich der Schwerkraft.

Eine synergistische chemische Atmosphäre gewährleistet einen gleichmäßigen Wasserstofffluss und reduziert lokale Erweichung. Während der Abkühlphase halten die Stützen niedrige Temperaturen aufrecht, um Verformungen durch thermische Spannungsentladung zu verhindern. Wiederverwendbare Werkzeuge müssen gereinigt werden, um Rückstände zu entfernen. Varianten wie flexible Keramikfaserstützen passen sich verschiedenen Formen an. Umweltfreundliches Materialrecycling senkt die Kosten.

#### 6.4.5 Sicherstellung einer gleichmäßigen Temperaturverteilung beim Sintern großformatiger Platten

Ein gleichmäßiges Temperaturfeld beim Sintern großformatiger Platten ist entscheidend für eine konsistente Mikrostruktur und Dichte. Dies wird durch die Minimierung von Temperaturgradienten mittels Ofenkonstruktion, Beladungsmethoden und Heizregelung erreicht, wodurch lokales Über- oder

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Unterbrechen verhindert wird. Große Platten weisen eine hohe Wärmekapazität auf, was zu einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung im Ofen führt. Chemisch beeinflussen Temperaturunterschiede den Zeitpunkt des Austritts der flüssigen Phase und führen so zu ungleichmäßigen Umlagerungen. Um dem entgegenzuwirken, wird die Ofenstruktur optimiert: Mehrere Heizzonen verfügen über eine unabhängige Temperaturregelung, und die Leistungsanpassung erfolgt mittels Mehrpunkt-Thermoelementen. Strahlungsschutzplatten verteilen den Wärmefluss gleichmäßig und reduzieren so Wärmeverluste an den Rändern.

Das Beladungsverfahren des Ofens legt Wert auf den Abstand und die Position der Rohlinge. Ein zusätzliches Heizelement befindet sich in der Mitte, und am Boden sorgt ein Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit für eine gleichmäßige Wärmeverteilung. Eine chemische Atmosphäre zirkuliert, wobei Wasserstoff über mehrere Kanäle in den Rühröfen ein- und austritt. Die Aufheizkurve ist segmentiert und verläuft allmählich; während der Haltezeit werden Anpassungen der Leistungsbilanz vorgenommen. Das Überwachungssystem erfasst das Temperaturfeld in Echtzeit und unterbricht die Anpassungen bei signifikanten Abweichungen.

Diese Art der Gewährleistung ist beim Sintern dicker Platten eine Herausforderung, da die mehrlagige Ofenbeschickung für eine gleichmäßige Erwärmung eine Drehung oder ein Wenden erfordert. Hochreine Ofenauskleidungen reduzieren Verunreinigungen, die die Wärmestrahlung beeinträchtigen. Gleichmäßige Kühlung verhindert thermische Spannungsgradienten. Zu den Varianten gehört die induktionsunterstützte Erwärmung mit lokaler Kompensation. Umweltfreundliches Energiemanagement spart Energie durch Mehrzonenregelung.

## 6.5 Wärmebearbeitung und Wärmebehandlung

Warmumformung und Wärmebehandlung sind die Verformungs- und Gefügesteuerungsphasen von Wolframlegierungsblechen – vom Sinterrohling bis zum fertigen Blech. Durch Hochtemperaturschmieden, Warmwalzen, Vorwalzen und Glühen werden Dickenreduzierung und Leistungsoptimierung erreicht. Dieses Verfahren behebt die Sprödigkeit des Sinterrohlings und führt zur Bildung von Faserstrukturen, um Festigkeit und Zähigkeit zu erhöhen. Das Prinzip der Warmumformung beruht auf dynamischer Erholung und Rekristallisation; chemisch gesehen aktivieren hohe Temperaturen Gleitsysteme, und die Binderphase koordiniert die Verformung der Wolframpartikel. Schmieden bricht die Gussstruktur auf, Warmwalzen reduziert die Dicke durch starke Verformung, und Zwischenglühen baut Spannungen ab und stellt die Plastizität wieder her. Die Wärmebehandlung umfasst Vakuumglühen und Auslagern zur Einstellung der Korngröße und der Ausscheidungen.

Die Prozessoptimierung konzentriert sich auf die Abstimmung von Temperaturfenstern und Umformgraden. Hochtemperaturverarbeitung ist einfacher, erfordert jedoch Schutz vor Oxidation, während Niedertemperaturhärtung zwar schneller ist, aber die Gefahr von Rissbildung birgt. Die Atmosphärenkontrolle erfolgt mittels Wasserstoff oder Vakuum, um Entkohlung oder Oxidation zu verhindern. Die Walzstichkonstruktion beinhaltet eine progressive Reduktion, und Schmierung reduziert Oberflächenschäden. Eine gleichmäßige Ofentemperatur während der Wärmebehandlung ist

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

entscheidend, da die Abkühlgeschwindigkeit das Mikrogefüge beeinflusst. Die Fehlervermeidung konzentriert sich auf Kantenrisse und Delaminationen, die durch Plattieren oder Seitendruck minimiert werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Warmumformung und Wärmebehandlung die technische Nutzung der Hochtemperaturplastizität demonstrieren und einen Umformweg für Wolframlegierungsbleche vom Massivmaterial bis zum Dünnblech bieten.

### 6.5.1 Schmiede- und Warmwalzverfahren

Schmieden und Warmwalzen sind die ersten Schritte der Warmumformung von Wolframlegierungsblechen. Durch die hohe Temperatur und die starke Verformung wird der Sinterblock gewalzt oder ausgedünnt, grobe Strukturen werden aufgebrochen und Verformungstexturen erzeugt. Dies bildet die Grundlage für das anschließende Kaltwalzen. Beim Schmieden wird üblicherweise Freiform- oder Gesenkschmieden angewendet. Der Block wird auf eine hohe Temperatur erhitzt und unter Wasserstoffatmosphäre gehämmert oder gepresst. Chemisch gesehen verringert die hohe Temperatur den Verformungswiderstand, und die Bindemittelphase fließt, um die Wolframpartikel einzuschließen und so ein Brechen zu verhindern. Mehrdirektionales Schmieden mit wechselnden Richtungen fördert eine gleichmäßige Verformung und führt zur Ausbildung einer anfänglichen Faserstruktur im Mikrogefüge.

Nach dem Schmieden folgt das Warmwalzen, wobei der Rohling durch mehrere Walzstiche weiter ausgedünnt wird. Jeder Walzstich führt zu einer signifikanten Materialreduktion, wobei die Walzen erhitzt oder der Rohling auf einer konstanten Temperatur gehalten wird. Chemisch gesehen bewirkt das Warmwalzen eine aktive dynamische Erholung, wobei die Umlagerung von Versetzungen die Verfestigung verringert. Eine Schutzatmosphäre oder Beschichtung verhindert Oxidation, und Schmierstoffe reduzieren die Reibung. Durch erneutes Erhitzen zwischen den Walzstichen wird die Plastizität wiederhergestellt. Die Parameteroptimierung beinhaltet eine schrittweise Temperaturabsenkung; ein anfängliches Walzen bei hoher Temperatur neigt zu Verformungen, während ein Nachwalzen bei niedriger Temperatur eine glatte Oberfläche gewährleistet.

Dieser Prozess ist besonders bei der Herstellung dicker Wolframlegierungsbleche deutlich zu erkennen. Hohe Umformung beim Schmieden beseitigt Sinterporosität, während Warmwalzen eine plattenartige Form erzeugt. Die Einhaltung der chemischen Reinheit ist entscheidend, und ein niedriger Taupunkt in der Atmosphäre verhindert Wasserstoffversprödung. Kantenrisse werden durch abgerundete Eckenwalzen oder Seitenführungen kontrolliert. Varianten umfassen das plattierte Warmwalzen zum Schutz der Oberfläche. Die Nutzung der Abwärme spart Energie.

### 6.5.2 Mehrdirektionales Schmieden verbessert die Mikrostrukturhomogenität

Das multidirektionale Schmieden ist eine effektive Methode zur Verbesserung der Mikrostrukturhomogenität bei der Warmumformung von Wolframlegierungsblechen. Durch wiederholtes Ändern der Umformrichtung wird eine gleichmäßige Verteilung der Eigenspannungen und der Mikrostruktur im Rohling erreicht, wodurch die durch das Sintern entstandenen Seigerungen und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Poren reduziert werden. Dieses Schmiedeverfahren findet breite Anwendung in der Rohlingvorbereitung. Nach dem Erhitzen des Rohlings auf eine hohe Temperatur wird dieser abwechselnd entlang mehrerer Achsen geschmiedet. Chemisch gesehen aktiviert die hohe Temperatur die koordinierte Verformung der Wolframpartikel, und die Bindemittelphase fließt in die Zwischenräume, wodurch die Partikelumlagerung gefördert und grobe Aggregate aufgebrochen werden. Unidirektionales Schmieden neigt zur Bildung gerichteter Texturen und Dichtegradienten, während multidirektionales Schmieden Seigerungen durch quer verlaufende Spannungsfelder auflöst und so die Mikrostruktur isotroper macht.

Der Schmiedeprozess umfasst typischerweise mehrere Runden mit jeweils wechselnder Richtung (z. B. entlang der XYZ-Achse). Die Gesamtverformung akkumuliert sich allmählich, und die wiederholte chemische Verformung bewirkt eine dynamische Erholung, wobei die Umlagerung von Versetzungen die lokale Verfestigung reduziert. Das Wiedererwärmen im Ofen zwischen den Richtungswechseln stellt die Plastizität wieder her und verhindert Kaltverformungsrisse. Die Vorteile des Verfahrens liegen in der Verbesserung der Gleichmäßigkeit im Kern großer Rohlinge und der Verringerung des Dichteunterschieds zwischen Rand und Mitte. Stützvorrichtungen erleichtern die Positionierung und verhindern asymmetrische Verformung.

Dieser Schmiedeprozess spielt eine wichtige Rolle bei der Herstellung hochdichter Wolframlegierungsbleche. Er führt zu einem verfeinerten Mikrogefüge, einer erhöhten Kugelformung der Wolframpartikel und einer verbesserten Grenzflächenhaftung. Die Einhaltung der chemischen Reinheit ist entscheidend, und eine Schutzatmosphäre ist unerlässlich, um Oxidation zu verhindern und eine optimale Umformung zu gewährleisten. Die Abstimmung von Schmiedefrequenz und Umformgrad verhindert zu hohe Umformgeschwindigkeiten, die zu inneren Rissen führen könnten. Variationen wie radial-axiale Kombinationen ermöglichen die Anpassung an unterschiedliche Formen. Die Nutzung der Abwärme spart Energie.

### 6.5.3 Zwischenglühen und Spannungsarmglühen

Zwischenglühen und Spannungsarmglühen sind notwendige Zwischenschritte in der Warmumformung von Wolframlegierungsblechen. Diese unter Vakuum oder Schutzgasatmosphäre durchgeführten Prozesse bauen beim Walzen entstandene Eigenspannungen und Kaltverfestigungen ab, stellen die Plastizität des Materials wieder her und bereiten es auf den nächsten Umformschritt vor. Die Wärmebehandlung erfolgt nach dem Warmwalzen oder zwischen Kaltwalzstichen, wobei die Temperatur unterhalb oder leicht oberhalb der Rekristallisationsschwelle gehalten wird. Chemisch gesehen treibt die Hochtemperaturdiffusion die Versetzungswanderung und -annihilation an, während die Erweichung der Binderphase den Spannungsabbau in den Wolframpartikeln koordiniert. Vakuumglühen verhindert Oxidation, und wasserstoffbasierte Prozesse reduzieren die Oberfläche zusätzlich.

Der Glühprozess umfasst Aufheiz-, Halte- und Abkühlphasen. Die Haltezeit ermöglicht eine ausreichende Spannungsrelaxation, eine chemische Verfeinerung des Mikrogefüges durch Korngrenzenwanderung sowie das Auflösen oder Homogenisieren ausgeschiedener Phasen. Langsames

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Abkühlen verhindert die Entstehung neuer Spannungen. Der Vorteil des Verfahrens liegt in der Vermeidung von Kantenrissen oder Delaminationen durch kumulative Verfestigung, was für die Erholung beim Mehrstichwalzen entscheidend ist. Das Temperaturfenster wird an das Legierungssystem angepasst; für Nickel-Eisen-Legierungen wird ein höheres Fenster verwendet, um die Erholung zu fördern. Diese Wärmebehandlung wird häufig bei der Dünnblechherstellung eingesetzt und umfasst zahlreiche Glühzyklen nach der starken Verformung durch Kaltwalzen, um eine optimale Gesamteffizienz des Prozesses zu gewährleisten. Die Reinheit der chemischen Atmosphäre ist entscheidend; niedrige Taupunkte verhindern Wasserstoffversprödung. Eine gleichmäßige Ofentemperatur sichert konsistente Ergebnisse über mehrere Rohlinge hinweg. Variationen wie das Gradientenglühen optimieren die Unterschiede zwischen Oberfläche und Kern. Die Wartung der Vakuumpumpe reduziert Verunreinigungen.

#### 6.5.4 Hochtemperatur-Lösungsglühen und schnelle Abkühlung

Hochtemperatur-Lösungsglühen und schnelles Abkühlen sind Verfahren zur Festigkeitssteigerung bei der Wärmebehandlung von Wolframlegierungsblechen. Durch das Auflösen der Legierungselemente bei hohen Temperaturen und deren rasche Fixierung in einem übersättigten Zustand werden die Festigkeit und die Hochtemperaturstabilität des Materials verbessert. Diese Behandlung wird häufig nach der Warmumformung oder bei Erfüllung spezifischer Leistungsanforderungen angewendet. Beim Lösungsglühen wird das Blech auf eine Temperatur oberhalb derjenigen erhitzt, bei der sich die Bindemittelphase vollständig aufgelöst hat, und auf dieser Temperatur gehalten. Chemisch gesehen lösen sich Wolframatome in begrenztem Umfang in der Bindemittelphase und bilden eine übersättigte feste Lösung. Die Diffusion von Grenzflächenelementen verbessert die Bindung. Die Haltezeit ermöglicht ein gleichmäßiges Auflösen und verhindert lokale Entmischungen.

Schnelles Abkühlen, beispielsweise durch Wasser- oder Gasabschrecken, friert das Material auf eine hohe Temperatur ein, hemmt chemisch die Ausfällung und erhält fein verteilte Phasen oder Mischkristallverfestigungseffekte. Die Wahl des Kühlmediums optimiert das Verhältnis von Abschreckspannung und Oxidationsrisiko; das Abschrecken mit Inertgas ist schonender. Die Vorteile des Verfahrens liegen in verbesserter Härte und Hitzebeständigkeit, wobei übersättigte Binderphasen Versetzungen blockieren und die Festigkeit erhöhen.

Diese Behandlung wird bei verschleißfesten oder wärmeableitenden Wolframlegierungsblechen angewendet und erhöht die Festigkeit nach der Lösungsglühung, erfordert jedoch die Überwachung der Zähigkeit. Ein chemisches Vakuum verhindert die Entkohlung. Präzise Temperaturregelung vermeidet Überhitzung und Kornvergrößerung. Variationen wie stufenweise Abkühlung optimieren die Spannungsverteilung. Umweltfreundliches Medienrecycling reduziert den Verbrauch.

#### 6.6 Kalt- und Warmwalzen zur Blechvorbereitung

Kalt- und Warmwalzen sind die Endbearbeitungsschritte bei der Herstellung von Wolframlegierungsblechen. Durch mehrstufiges Walzen bei Raumtemperatur oder mittleren

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Temperaturen wird der warmverformte Rohling schrittweise auf die Zieldicke ausgedünnt, wodurch ein feines Mikrogefüge und eine exzellente Oberflächenqualität entstehen. Dieses Verfahren eignet sich zur Herstellung von Blechen mit Abmessungen von Millimetern bis Mikrometern. Kaltwalzen bei Raumtemperatur führt zu einer deutlichen Kaltverfestigung und einer hohen Gesamtverformung. Warmwalzen hingegen fördert die Rückstellung im mittleren Temperaturbereich und reduziert so das Risiko von Rissen. Die Prozessprinzipien umfassen die Versetzungsvermehrung, die dynamische Rückstellung und die Texturbildung. Chemisch gesehen koordiniert die Binderphase die Wolframpartikel während der Verformung und verhindert so Sprödbrüche. Die Reduktionsverteilung pro Walzstich muss stufenweise erfolgen, mit einer hohen anfänglichen Reduktion zur Formgebung und einer geringeren Reduktion zur Endbearbeitung in den späteren Stadien. Walzrichtung und Texturkontrolle beeinflussen die Anisotropie, und die Kantenbearbeitung beugt Rissen vor.

Die Prozessoptimierung konzentriert sich auf Schmierung und Spannungsregelung. Beim Kaltwalzen wird die Reibung durch Ölschmierung reduziert, während beim Warmwalzen Inertgas zum Schutz vor Oxidation eingesetzt wird. Zwischenglühphasen bauen Spannungen ab und stellen die Plastizität wieder her. Die Dünnblechproduktion erfordert Walzpräzision und ein hochsteifes Walzsystem, um Dickenschwankungen zu vermeiden. Die Fehlervermeidung konzentriert sich auf Risse und Orangenhaut, die durch Beschnitt und Oberflächenprüfung minimiert werden.

#### **6.6.1 Spezifikation für die Gesamtumformungsverteilung beim Kaltwalzen und die Anzahl der Walzstiche**

Die Verteilung der gesamten Kaltwalzverformung und die Festlegung des Walzstichplans sind die zentralen Planungsaspekte des Blechdünnungsprozesses von Wolframlegierungen. Durch eine rationale Verteilung der Gesamtbearbeitungsgeschwindigkeit und der Einzelstichverformung werden eine gleichmäßige Verformung und kontrollierbare Spannungen gewährleistet, wodurch Risse und Verzug vermieden werden. Dieser Plan beginnt mit einem warmgewalzten Rohling, bei dem die Gesamtverformung oft hoch ist, um eine Feinkornverfestigung und Dickengenauigkeit zu erzielen. Das Verteilungsprinzip besteht darin, zunächst in jedem Stich eine größere Verformung zu nutzen, um die Restthermoplastizität für die Formgebung auszunutzen, und dann die Verformung in späteren Stichen schrittweise zu reduzieren, um die Oberfläche zu verfeinern. Chemisch gesehen aktiviert die große Verformung das Mehrgleitsystem, wodurch die Binderphase vollständig fließen und die Wolframpartikel einkapseln kann, wodurch Partikelbruch reduziert wird. Die Plangestaltung berücksichtigt den Materialzustand: Die anfängliche Kaltverfestigung verläuft langsam und ermöglicht eine größere Verformung, während die spätere Verfestigungsakkumulation eine geringere Verformung und längere Glühintervalle erfordert. Die gleichmäßige Anwendung von Schmieröl zwischen den Stichen reduziert die Walzenreibung und verhindert chemisch das Festkleben der Walzen, das Oberflächenkratzer verursachen kann. Die Spannungsregelung trägt zur Stabilisierung der Blechform bei und verhindert Wellenbildung in der Mitte oder an den Rändern. Die Gesamtverformung wird anhand der Zieldicke berechnet; ultradünne Bleche erfordern mehrere Walz- und Glühzyklen.

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

Dieses Verfahren ermöglicht flexible Anpassungen beim Übergang von Standarddicken zu dünnen Blechen. Hochwolframhaltige Legierungen werden schonend gewalzt, um Kantenrisse zu vermeiden. Die chemische Atmosphärensteuerung verhindert die Oxidation des gewalzten Blechs. Das Verfahren erfasst die Walzdicke und korrigiert Abweichungen in Echtzeit. Varianten wie das asymmetrische Walzen optimieren die Blechform. Umweltfreundliches Schmierstoffrecycling reduziert die Umweltbelastung.

#### 6.6.2 Anwendung des Warmwalzens bei Legierungen mit hohem Wolframgehalt

Das Warmwalzen von hochwolframhaltigen Legierungen mindert das mit dem Kaltwalzen bei Raumtemperatur verbundene Sprödigkeitsrisiko durch Walzen im mittleren Temperaturbereich. Dabei wird eine moderate Erwärmung genutzt, um den Erholungsmechanismus zu aktivieren und so dünnere Profile bei hoher Umformung zu erzielen. Dieses Verfahren eignet sich besonders für Legierungssysteme mit hohem Wolframgehalt. Die Warmwalztemperatur wird unterhalb der Erholungs-Rekristallisationstemperatur gehalten. Die chemische Erwärmung reduziert den Verformungswiderstand, erweicht die Binderphase zur Verbesserung der Koordination und verringert den Gleitwiderstand der Wolframpartikel. Dadurch werden Kantenrisse, die beim Kaltwalzen häufig auftreten, vermieden. Das Walzwerk ist mit Heizvorrichtungen ausgestattet oder erwärmt den Walzrohling vor, und eine Schutzgasatmosphäre verhindert Oxidation.

Die Vorteile des Warmwalzens liegen in der ausgewogenen Härtung und Rückstellung, dem höheren Umformgrad pro Walzstich im Vergleich zum Kaltwalzen, der höheren Gesamteffizienz des Prozesses und den kürzeren Glühzeiten. Chemisch betrachtet weist das Warmwalzen eine aktivere dynamische Rückstellung auf, wodurch die Versetzungsumlagerung und -ansammlung reduziert wird und eine Oberflächenqualität erzielt wird, die der des reinen Kaltwalzens überlegen ist. Das Verfahren kombiniert den Übergang vom Warmwalzen zum Kaltwalzen und stellt somit einen hybriden Prozess dar. Hochwolframhaltige Legierungen weisen weniger Binderphasen auf, und das Warmwalzen erweitert das Umformfenster.

Diese Anwendung zeigt erhebliches Potenzial bei ultradünnen, hochdichten Wolframlegierungsblechen. Nach dem Warmwalzen entsteht ein feines, faseriges Mikrogefüge mit ausgewogener Festigkeit und Zähigkeit. Chemische Schmierung gewährleistet die Anpassungsfähigkeit an hohe Temperaturen, während Graphit oder Spezialöle das Anhaften verhindern. Eine gleichmäßige Temperaturverteilung ist entscheidend, und Induktionserwärmung sorgt für eine schnelle Reaktion. Varianten beinhalten eine Unterstützung der Walzenerwärmung. Eine umweltgerechte Abgasabsaugung gewährleistet die Sicherheit.

#### 6.6.3 Steuerung der Rollrichtung und Optimierung der Textur

Die Steuerung der Walzrichtung und die Optimierung der Textur sind Methoden zur Mikrostrukturkontrolle beim Kalt- und Warmwalzen von Wolframlegierungsblechen. Durch die Anpassung der Verformungstextur und der Kristallorientierung mittels unidirektionaler, kreuz- oder

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

multidirektionaler Walzwege werden die Anisotropie und die Eigenschaften des Materials beeinflusst. Diese Optimierung ermöglicht die richtungsabhängige Steuerung von Festigkeit, Zähigkeit und Wärmeausdehnung. Unidirektionales Walzen erzeugt eine ausgeprägte Fasertextur, verlängert die Wolframpartikel in Walzrichtung und führt aufgrund der planaren Stapelung chemischer Versetzungen zu einer Vorzugsorientierung. Dies erhöht die Längsfestigkeit, verringert aber die Querkähigkeit. Beim Kreuzwalzen dreht sich das Walzgut in jedem Walzstich um 90 Grad, wodurch die Orientierung aufgebrochen und die Textur in einen zufälligeren Zustand überführt wird.

Die Optimierungsprinzipien werden anwendungsabhängig ausgewählt. Abschirmbleche erfordern isotropes Kreuzwalzen, während Bauteile mit Längsfestigkeit unidirektionales Walzen benötigen. Mehrdirektionale Varianten, wie beispielsweise Pendelwalzen, homogenisieren das Material zusätzlich. Chemisch beeinflusst die Textur die Verteilung der Phasengrenzspannungen; eine Optimierung reduziert die Nachwärmebehandlung. Durch Glühen, kombiniert mit anderen Verfahren, lässt sich die Texturstärke steuern; Hochtemperaturglühen schwächt sie, während Niedertemperaturglühen sie erhält. Diese Kontrolle und Optimierung hat einen signifikanten Einfluss auf die Folienproduktion. Ultradünne Folien mit ausgeprägten Texturen neigen zum Biegen und Reißen, was durch Kreuzoptimierung verbessert wird. Die Orientierungsdichte wird mittels chemischer Analyse und Röntgenbeugungspolfiguren bestimmt. Orientierungsmarkierungen erleichtern die Weiterverarbeitung des Fertigprodukts. Zu den Varianten gehört das Schrägwalzen für spezielle Texturen. Umweltfreundliche Walzensysteme werden zur Reinigung und zum Schutz vor Kratzern eingesetzt.

#### 6.6.4 Kantenrissvermeidung und Beschnittverfahren

Kantenrissvermeidung und Kantenbeschneidung sind entscheidende Aspekte des Fehlermanagements beim Walzen von Wolframlegierungsblechen. Durch die Anpassung der Walzparameter, den Kantenschutz und regelmäßiges Beschneiden werden Rissbildung und -ausbreitung reduziert, wodurch die Blechintegrität und die Streckgrenze sichergestellt werden. Kantenrisse entstehen durch Spannungskonzentrationen, die chemisch bedingt durch hohe Scherkräfte an den Kanten der Wolframpartikel und unzureichende Phasenbindung sind. Zu den vorbeugenden Maßnahmen gehören die schrittweise Reduzierung des Walzdrucks pro Walzstich, sanfte Kantenübergänge und der Einsatz von Seitenführungswalzen, um die Blechform zu fixieren und zu verhindern, dass Kantenwelligkeit Zugspannungen verursacht.

Beim Beschneiden werden Schermaschinen oder Trennschleifer eingesetzt, um gerissene Kanten regelmäßig zu entfernen. Die chemische Reinigung der Schnittflächen verhindert die Entstehung weiterer Risse. Zur Vorbeugung gehören außerdem eine gleichmäßige Schmierung und das Auftragen einer zusätzlichen Beschichtung auf die Kanten, um Trockenreibung zu vermeiden. Warmwalzen reduziert die Rissanfälligkeit, während Kaltwalzen die Verfestigung überwacht und gegebenenfalls ein sofortiges Glühen ermöglicht.

Dieses Verfahren zur Rissvermeidung und -beschneidung wird häufig beim Dünnblechwalzen eingesetzt, da sich Risse im ultradünnen Stadium leicht ausbreiten und daher kurze Beschneidungsintervalle

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

erforderlich sind. Die chemische Oberflächenprüfung wird durch Fluoreszenz-Eindringprüfung unterstützt. Beschnittabfälle werden recycelt und pulverisiert. Varianten wie das Laserbeschneiden ermöglichen präzise, gratfreie Oberflächen. Umweltfreundliche Kühlschmierstofffiltration gewährleistet die Sicherheit.

## 6.7 Oberflächenbehandlung und Veredelung

Die Oberflächenbehandlung und -veredelung bilden die letzten Schritte der Blechfertigung aus Wolframlegierungen. Verfahren wie chemische Reinigung, maschinelle Bearbeitung und thermisches Richten beseitigen Oberflächenfehler, verbessern Ebenheit und Glätte und optimieren Aussehen, Korrosionsbeständigkeit und funktionelle Anpassungsfähigkeit des Materials. Dieser Prozess beeinflusst direkt die Oberflächenintegrität und die Haftung des Blechs in Präzisionsanwendungen. Die Oberflächenbehandlung zielt auf die Entfernung von Oxidschichten, angereicherten Phasen und rauen Oberflächen ab, die durch Walzen oder Wärmebehandlung entstanden sind. Die Veredelung sorgt für Maßgenauigkeit und Kantenqualität. Die Prozessprinzipien umfassen chemische Auflösung, mechanische Abtragung und thermische Spannungsentlastung. Die chemische Behandlung bietet hohe Selektivität, die mechanische Behandlung hohe Effizienz, und das thermische Richten vereint die Vorteile beider Verfahren. Die Bearbeitungsreihenfolge umfasst typischerweise Reinigung und Dekontamination, gefolgt von Polieren und schließlich dem Ablängen.

Der Oberflächenbearbeitungsprozess legt Wert auf zerstörungsfreie Bearbeitung und Sauberkeit. Chemische Reinigung verhindert Restkorrosion, mechanisches Polieren kontrolliert das Einbetten von Partikeln und Vakuum-Thermoplanieren verhindert erneute Oxidation. Laser- oder Wasserstrahlschneiden ermöglicht die Herstellung komplexer Formen und reduziert die Wärmeeinflusszone. Die Qualitätskontrolle umfasst die Messung der Oberflächenrauheit und die Sichtprüfung, um den Ra-Wert und die Rissfreiheit sicherzustellen. Umweltaspekte umfassen die Neutralisierung und das Recycling von Abfallflüssigkeiten sowie die sichere Staubabsaugung.

### 6.7.1 Chemische Reinigung und Säurebeize zur Entfernung der Oxidschicht

Chemische Reinigung und Beizen zur Entfernung der Oxidschicht sind die ersten Schritte der Oberflächenbehandlung von Wolframlegierungsblechen. Saure Lösungen lösen und entfernen die beim Walzen oder der Wärmebehandlung entstandenen Oxidschichten und Verunreinigungen. Dadurch wird der metallische Glanz wiederhergestellt und ein sauberes Substrat für die Weiterverarbeitung geschaffen. Dieses Verfahren löst Oxide selektiv und schont das Substrat dabei minimal. Der Reinigungsprozess beginnt mit einer alkalischen Wäsche zur Ölentfernung, gefolgt vom Beizen, um primär die Oxide zu entfernen. Chemisch besteht die Oxidschicht hauptsächlich aus Wolframoxid und Bindemitteloxyden, die durch Mischungen aus Salpetersäure, Fluorwasserstoffsäure oder Schwefelsäure effektiv gelöst werden. Dabei bildet das Wolfram Komplexe, die in Lösung gehen. Beizezeit und -temperatur werden sorgfältig kontrolliert, um ein Überätzen zu vermeiden, das zu Lochfraß oder Wasserstoffversprödung führen kann.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Die Vorteile des Verfahrens liegen in der effizienten Entfernung dünner Oxidschichten, der Eignung für Bleche unterschiedlicher Dicke und der Möglichkeit, die chemische Zusammensetzung an das jeweilige Legierungssystem anzupassen. In Nickel-Kupfer-Systemen verhindert die niedrige Säurekonzentration eine übermäßige Kupferauflösung. Nach der Reinigung, dem Spülen mit Wasser und der Neutralisation erfolgt die Passivierung zur Bildung eines temporären Schutzfilms. Die Abwasserbehandlung umfasst die Neutralisation und Rückgewinnung von Fluoridionen oder Nitraten. Dieses Reinigungsverfahren findet breite Anwendung bei warmgewalzten Blechen. Die Entfernung dicker Oxidschichten verbessert die Oberflächenaktivität und erleichtert das Polieren oder Beschichten. Die chemische Überwachung von pH-Wert und Konzentration gewährleistet eine gleichbleibende Chargenqualität. Varianten wie die ultraschallunterstützte Auflösung beschleunigen den Prozess. Ein geschlossenes Umweltsystem reduziert die Emissionen.

#### **6.7.2 Durch Alkaliwäsche wird die Oberflächenanreicherung der Bindemittelphase entfernt.**

Die alkalische Reinigung zur Entfernung von Oberflächenablagerungen der Bindemittelphase ist ein gezieltes Oberflächenbehandlungsverfahren für Wolframlegierungsbleche. Dabei wird die durch Walzen oder Wärmebehandlung entstandene Oberflächenablagerung der Bindemittelphase selektiv mit einer alkalischen Lösung gelöst, wodurch die Oberflächenzusammensetzung ausgeglichen und die Korrosionsbeständigkeit verbessert wird. Dieses Verfahren wird bei Legierungen mit hohem Bindemittelphasenanteil angewendet, um eine bevorzugte Korrosion der angereicherten Schicht zu vermeiden. Der Reinigungsprozess beinhaltet das Eintauchen in eine heiße Lösung von Natriumhydroxid oder Natriumcarbonat. Chemisch reagiert die Lauge mit Nickel- oder Kupferoxiden unter Bildung löslicher Salze, während die inerte Wolframphase weitgehend unlöslich bleibt. Die angereicherte Oberflächenschicht wird anschließend dünn abgetragen, wodurch das Substrat freigelegt wird.

Das Verfahren bietet Vorteile wie hohe Selektivität, minimale Schädigung des Wolframgerüsts und Eignung für nichtmagnetische oder wärmeleitende Bleche. Präzise Temperatur- und Zeitsteuerung beschleunigen die Auflösung und verhindern gleichzeitig übermäßige Lochfraßbildung. Nach der Reinigung wird die restliche Lauge mit Säure neutralisiert, gefolgt von Spülung und Trocknung. Zusätzliches Rühren oder Ultraschallbehandlung verbessern die Gleichmäßigkeit. Diese alkalische Wäsche ist besonders effektiv bei Blechen aus Nickel-Kupfer-Systemen, da sich Kupfer auf der Walzoberfläche ansammelt, was nach der Wäsche zu einer gleichmäßigen Leitfähigkeit führt. Die chemische Analyse der Oberflächenzusammensetzung bestätigt die Entfernungswirkung. Varianten wie die elektrolytische alkalische Wäsche beschleunigen den Prozess. Die Regeneration und das Recycling der umweltfreundlichen alkalischen Lösung sind ebenfalls möglich.

#### **6.7.3 Mechanisches Schleifen und Polieren**

Mechanisches Schleifen und Polieren sind die wichtigsten Verfahren zur Oberflächenbearbeitung von Wolframlegierungsblechen. Mithilfe von Schleifbändern, Schleifscheiben oder Polierpaste werden Oberflächenrauheit und Defekte schrittweise entfernt, um eine hohe Glätte und geringe Rauheit zu erzielen. Dieses Verfahren eignet sich für Bleche unterschiedlicher Dicke und verbessert sowohl das

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

Aussehen als auch die funktionelle Oberflächenqualität. Das Schleifen beginnt mit einem Grobschleifen, um Oxidspuren und Wellen zu entfernen, gefolgt von einem immer feineren Schleifen mit Schleifbändern oder Schleifscheiben. Durch chemische und mechanische Scherung wird Material abgetragen; aufgrund der hohen Härte von Wolfram sind Diamant- oder Borcarbid-Schleifmittel erforderlich. Beim Polieren wird eine weiche Polierscheibe mit Polierpaste verwendet; die feine Reibung erzeugt eine spiegelglatte Oberfläche.

Das Verfahren bietet kontrollierbare Präzision mit einem stufenweise abnehmenden Ra-Wert und eignet sich sowohl für ebene als auch gekrümmte Oberflächen. Es ist Trocken- oder Nassschleifen möglich, wobei beim Nassschleifen Kühlung zum Schutz vor Hitzeschäden eingesetzt wird. Die Körnung wird von grob nach fein abgerichtet, mit einer Zwischenreinigung, um das Einbetten von Partikeln zu verhindern. Diese Schleif- und Poliertechnik ist ideal für hochpräzise medizinische Kollimatorplatten und reduziert die Streuung in der Spiegeloberfläche. Das Polieren nach der chemischen Reinigung verhindert die Ansammlung von Rückständen. Varianten umfassen das Vibrationspolieren zur gleichmäßigen Formgebung komplexer Strukturen. Die Staubabsaugung erfolgt umweltgerecht.

#### 6.7.4 Thermisches Nivellierungsverfahren unter Vakuum-/Wasserstoffschutz

Das Richten dünner Wolframlegierungsbleche erfolgt durch Hochtemperatur-Zugspannung oder Walzen unter Schutzgasatmosphäre. Dadurch werden Eigenspannungen abgebaut, die Ebenheit und Dimensionsstabilität des Blechs verbessert. Dieses Verfahren eignet sich besonders für leicht verzugsfähige dünne Bleche. Dabei wird das Blech in einem Vakuum- oder Wasserstoffofen auf seine Spannungsarmglühtemperatur erhitzt, leicht gespannt oder durch Richtwalzen geführt. Chemisch gesehen bewirkt die Hochtemperaturdiffusion die Entspannung von Versetzungen, wodurch die Bindemittelphase erweicht und die Verformung koordiniert wird. Vakuum verhindert Oxidation, während Wasserstoff die Oberfläche reduziert.

Die Vorteile liegen in der berührungslosen oder minimalen Berührung, die zu einer makellosen Oberfläche und hoher Ebenheit führt. Temperaturen unterhalb der Rekristallisationstemperatur verhindern Gefügeveränderungen. Eine gleichmäßige Spannungsregelung verhindert lokale Dehnungen. Dieses Verfahren findet breite Anwendung bei ultradünnen Wolframlegierungsblechen, wo der Verzug nach dem Kaltwalzen durch Warmrichten korrigiert wird. Chemische Reinheit ist entscheidend, und ein niedriger Taupunkt verhindert Wasserstoffversprödung. Eine Variante ist das kontinuierliche Ofen-Spannungsrichten. Es bietet eine luftdichte und energieeffiziente Umgebung.

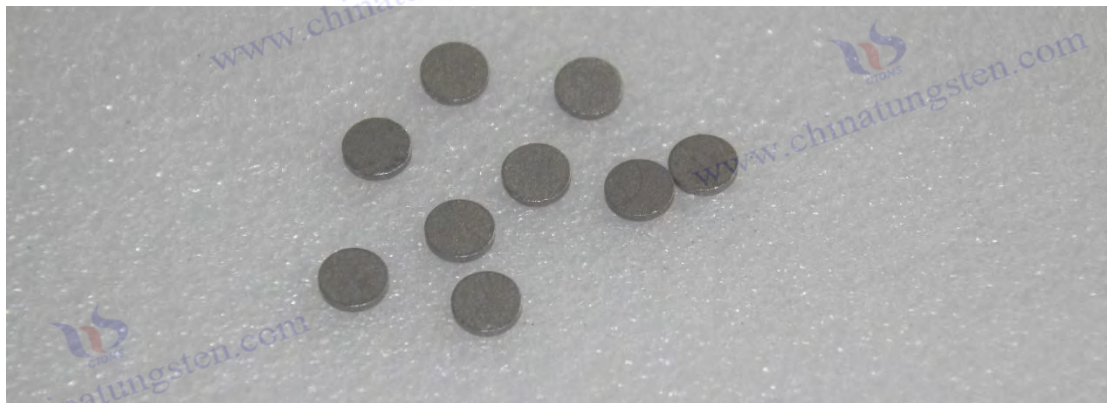
#### 6.7.5 Präzisionsscheren, Laserschneiden und Wasserstrahlschneiden

Präzisionsscheren, Laserschneiden und Wasserstrahlschneiden sind Verfahren zur präzisen Bearbeitung von Wolframlegierungsblechen, auch von Blechen mit unregelmäßigen und dimensional Formen. Diese Verfahren nutzen mechanische Schneidmesser, Laserstrahlen oder Hochdruckwasserstrahlen, um saubere Kanten und komplexe Formen zu erzielen und so unterschiedlichen Anforderungen an die Endbearbeitung gerecht zu werden. Beim Präzisionsscheren kommen hochpräzise Schermaschinen mit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

scharfen Schneidkanten zum Einsatz, wodurch ein Bruch durch chemisch konzentrierte Scherkräfte entsteht. Das Verfahren eignet sich für rechteckige Bleche mit geraden Kanten; der einstellbare Spalt verhindert Gratbildung.

Beim Laserschneiden wird ein Hochenergielaser zum Schmelzen und Verdampfen von Werkstoffen eingesetzt, gefolgt von der Entfernung der Schlacke mit Schutzgas. Chemisch betrachtet weist das Verfahren eine geringe Wärmeeinflusszone auf und eignet sich daher für komplexe Konturen und Bohrungen. Die Steuerung der Leistungsdichte ermöglicht schmale Schnittfugen. Beim Wasserstrahlschneiden wird ein Hochdruck-Wasserstrahl mit abrasivem Gemisch verwendet. Dies führt zu einem Kaltschnitt ohne thermische Verformung und rein mechanischem Abrieb, der sich für dicke Bleche oder thermistorische Legierungen eignet. Dieses Schneidverfahren ist flexibel bei kundenspezifischen Wolframlegierungsblechen und erzeugt präzise Laserbohrungen sowie spannungsfreie Wasserstrahlkanten. Die chemische Reinigung nach dem Schneiden verhindert Verunreinigungen. Varianten wie Faserlaser können die Geschwindigkeit erhöhen. Die Abfälle sind umweltgerecht recycelbar.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsbleche

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

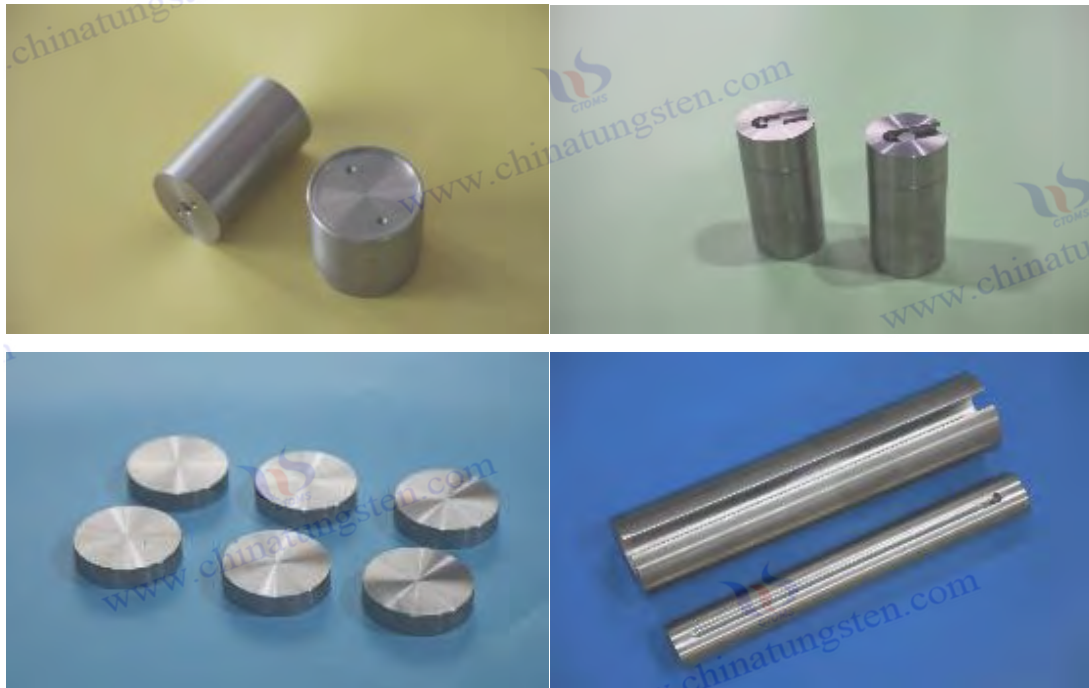
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

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



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Kapitel 7 Anwendung von Wolframlegierungsblechen

### 7.1 Anwendung von Wolframlegierungsblechen in der Verteidigungs- und Militärindustrie

Wolframlegierungsbleche werden vorwiegend in der Verteidigungs- und Militärindustrie für Bauteile eingesetzt, die eine hohe Dichte, Festigkeit und Zähigkeit erfordern. Ihr hoher Schmelzpunkt und ihre Verschleißfestigkeit gewährleisten eine stabile Leistung auch unter extremen Bedingungen. Zu den Anwendungsgebieten zählen Gegengewichte und Schutzstrukturen, wobei die funktionale Integration durch die Verarbeitung erreicht wird.

#### 7.1.1 Wolframlegierungsblech für panzerbrechende Zwecke

Wolframlegierungsbleche in panzerbrechenden Bauteilen nutzen ihre hohe Dichte und selbstschärfenden Eigenschaften, um eine hohe Konzentration kinetischer Energie und Durchschlagskraft zu erzielen. Die Legierungszusammensetzung gewährleistet ein ausgewogenes Verhältnis von Härte und Zähigkeit, und die bearbeitete Oberfläche sorgt für Stabilität bei hohen Geschwindigkeiten.

#### 7.1.2 Wolframlegierungsblech für Gegengewicht

Wolframlegierungsbleche dienen als Gegengewichtsmaterialien. Durch ihre hohe Dichte ermöglichen sie eine Gewichtsverlagerung auf engstem Raum und tragen so zum Ausgleich der Trägheit und zur Vibrationsdämpfung bei. Die gleichmäßige Dicke gewährleistet Präzision, und die Oberflächenbehandlung erhöht die Haltbarkeit.

#### 7.1.3 Wolframlegierungsblech zum Schutz

Wolframlegierungsbleche spielen eine Rolle bei der Strahlungsdämpfung und Stoßabsorption in Schutzstrukturen und bieten eine hochdichte, dünne und hocheffiziente Abschirmung. Die Verbundkonstruktion erhöht die Gesamtfestigkeit und eignet sich für mehrschichtige Schutzsysteme.

### 7.2 Anwendung von Wolframlegierungsblechen in der High-End-Fertigung

Wolframlegierungsbleche finden in der High-End-Fertigung vor allem aufgrund ihrer Kombination aus hoher Dichte, hoher Härte und guter Bearbeitbarkeit Anwendung. Ihre Einsatzmöglichkeiten umfassen den Formenbau, Schneidwerkzeuge und Präzisionsbauteile und tragen dazu bei, die Konstruktionsziele Miniaturisierung, hohe Zuverlässigkeit und lange Lebensdauer zu erreichen. Durch Pulvermetallurgie und Präzisionswalzen erzielen Wolframlegierungsbleche ein gleichmäßiges Mikrogefüge. Dies sorgt für Verschleißfestigkeit und Beständigkeit gegen Erweichung bei hohen Temperaturen in Formeinsätzen, bietet harte Unterstützung in Schneidwerkzeugen und ermöglicht durch die hohe Dichte die Anpassung der Massenverteilung in mechanischen Gegengewichten. In der Anwendung werden Wolframlegierungsbleche häufig mit anderen Werkstoffen kombiniert oder oberflächenbehandelt, um ihre Einsatzmöglichkeiten weiter auszubauen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochwertige Fertigungsprozesse erfordern ein hohes Maß an Ausgewogenheit der Materialeigenschaften. Wolframlegierungsbleche eignen sich aufgrund ihres hohen Elastizitätsmoduls und ihrer thermischen Stabilität hervorragend für Anwendungen mit hohen Belastungen, hohen Temperaturen oder hohen Präzisionsanforderungen. Im Zuge der Entwicklung hin zu intelligenten und leichten Konstruktionen erweitert sich der Einsatzbereich von Wolframlegierungsblechen von traditionellen Formen hin zu Trägermaterialien für die additive Fertigung und Komponenten für Präzisionsinstrumente. Oberflächenbeschichtungen oder Wärmebehandlungen können ihre Korrosionsbeständigkeit und Haftungseigenschaften weiter optimieren, um komplexen Betriebsbedingungen gerecht zu werden. Wolframlegierungsbleche sind in verschiedenen Stärken erhältlich, wobei dünnere Bleche für präzise Einlagen und dickere Bleche für strukturelle Stützkonstruktionen geeignet sind.

### 7.2.1 Wolframlegierungsblech für Formeinsätze

Wolframlegierungsbleche in Formeinsätzen zeichnen sich durch ihre hohe Härte, Verschleißfestigkeit und Beständigkeit gegen Erweichung bei hohen Temperaturen aus. Diese Anwendung findet breite Anwendung in Kunststoff-Spritzgussformen, Druckgussformen und Glas-Heißpressformen und trägt zur Verlängerung der Werkzeuglebensdauer und Verbesserung der Produktqualität bei. Als zentrales Funktionselement des Werkzeugs ist der Formeinsatz wiederholt hohen Temperaturen, hohem Druck und Verschleiß ausgesetzt. In den Werkzeugkörper eingebettete Wolframlegierungsbleche bieten lokal hochverschleißfeste Bereiche und reduzieren so den Gesamtmaterialverbrauch des Werkzeugs. Die Zweiphasenstruktur des Wolframlegierungsblechs spielt eine entscheidende Rolle im Einsatz: Wolframpartikel wirken als harte Phase und widerstehen abrasiver Erosion, während die Bindemittelphase eine gewisse Zähigkeit verleiht und Sprödbrüche verhindert.

In Spritzgussformen werden Wolframlegierungsbleche häufig an den Kavitätenrändern oder Angussstellen eingesetzt, um den Stößen und Temperaturwechseln des geschmolzenen Kunststoffs standzuhalten. Durch Oberflächenpolieren wird das Anhaften an der Form verringert und die Entformungseffizienz verbessert. In Druckgussformen sind die Einsätze Hochgeschwindigkeitsstößen und der Korrosion durch geschmolzenes Metall bei hohen Temperaturen ausgesetzt; die thermische Stabilität der Wolframlegierungsbleche trägt zur Maßgenauigkeit bei und reduziert thermische Ermüdungsrisse. In Heißpressformen für Glas gewährleisten ihre geringe Wärmeausdehnung und hohe Härte die Formtreue beim Formen von optischen Präzisionsbauteilen. Bei der Konstruktion von Einsätzen werden Wolframlegierungsbleche durch Hartlöten, Einlegen oder Verschrauben mit dem Formstahl verbunden; Oberflächenbehandlungen wie Vernickeln verbessern die Haftung.

Die Anwendungsbereiche haben sich auf hochpräzise Stanzwerkzeuge erweitert. Einsätze aus Wolframlegierungen werden beim Spritzgießen von Handygehäusen oder elektronischen Steckverbindern eingesetzt, um wiederholtem Stanzen von Edelstahl- oder Titanlegierungsblechen standzuhalten. Ein Oberflächenhärtegradient sorgt für ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Verschleiß- und Abplatzfestigkeit. In den letzten Jahren hat die rasante Entwicklung von Elektrofahrzeugen und Unterhaltungselektronik die Nachfrage nach langlebigen Werkzeugen vorangetrieben und die Entwicklung von Wolframlegierungseinsätzen hin zu nanokristallinen oder

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dispersionsverfestigten Materialien vorangetrieben, wodurch die Dauerfestigkeit weiter verbessert wird. Oberflächenbeschichtungen wie DLC oder TiAlN sind gängig und bilden durch chemische Gasphasenabscheidung einen harten Film, der synergistisch mit dem Substrat zusammenwirkt und so die Verschleißfestigkeit erhöht. Die Dicke des Wolframlegierungseinsatzes wird entsprechend der Werkzeuggröße gewählt; dünnere Einsätze werden in Mikrowerkzeugen verwendet, während dickere Einsätze höhere Belastungen aufnehmen können.

Die Verarbeitungstechnologie beeinflusst die Anwendungswirkung; Präzisionsschleifen gewährleistet die Planheit der Einsätze, und Wärmebehandlung optimiert die Härteverteilung. Bei der Werkzeugwartung lassen sich Wolframlegierungsbleche einfach vor Ort austauschen, was die Gesamtkosten senkt. Hinsichtlich der Umweltverträglichkeit bleiben die Einsätze in Hochtemperatur-Ölschmierung oder wasserbasierten Kühlmitteln stabil. Der Einsatz von Wolframlegierungsblechen fördert zudem den modularen Werkzeugbau, und standardisierte Einsatzspezifikationen vereinfachen die Lagerhaltung.

### 7.2.2 Wolframlegierungsbleche für Schneidwerkzeuge

Wolframlegierungsbleche werden hauptsächlich in Schneidwerkzeugen als Substrat oder Wendeschneidplatte eingesetzt. Ihre hohe Härte und thermische Stabilität tragen zur Schneidunterstützung bei. Diese Anwendung findet sich bei bestimmten Spezialschneidwerkzeugen und verschleißfesten Wendeschneidplatten, die die Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe oder den Einsatz unter hohen Temperaturen ermöglichen. Im Werkzeugbau werden Wolframlegierungsbleche häufig mit Hartmetall oder Keramik zu einer Hybridstruktur kombiniert. Die Wolframlegierung bildet eine robuste Basis, auf die eine harte Schicht aufgeschweißt oder aufgelötet wird, was die Gesamtstandzeit des Werkzeugs verlängert. Die hohe Dichte der Wolframlegierungsbleche trägt zur Auswuchtung und Vibrationsreduzierung in rotierenden Werkzeugen bei.

Bei Dreh- und Fräswerkzeugen werden Wendeschneidplatten aus Wolframlegierung in Werkzeughaltem oder Werkzeugstützen eingesetzt, um Schnittkräften und thermischen Belastungen standzuhalten. Die gebundene Phase koordiniert die Verformung und absorbiert Stöße, wodurch ein Ausbrechen der Werkzeugspitze verhindert wird. Die chemische Stabilität macht das Werkzeug korrosionsbeständig in Kühlmedien, und Oberflächenbehandlungen wie die stromlose Metallisierung bieten zusätzlichen Schutz. Die Anwendungsbereiche erstrecken sich auch auf Werkzeuge für die Holz- und Verbundwerkstoffbearbeitung, wo Wendeschneidplatten aus Wolframlegierung Faserabrieb widerstehen und eine scharfe Schneide gewährleisten.

Wolframlegierungsbleche werden auch in Buchsen für bestimmte Drahtzieh- oder Extrusionswerkzeuge eingesetzt. Dabei werden Wolframlegierungsringe oder -bleche in die Innenbohrung eingelassen, um dem Abrieb durch Metallfluss entgegenzuwirken. Die Blechdicke richtet sich nach der Werkzeugkörperform: Dünnere Bleche eignen sich für Präzisionswerkzeuge mit geringer Belastung, während dickere Bleche für schwere Schneidarbeiten verwendet werden. Oberflächenstrukturierung, beispielsweise durch Lasermikrostrukturierung, verbessert die Spanabfuhr. Der Einsatz von

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframlegierungsblechen in Schneidwerkzeugen fördert die Entwicklung von Mehrkomponenten-Verbundwerkstoffen, und Lötverbindungen optimieren die Haftfestigkeit.

In den letzten Jahren haben sich Wolframlegierungsbleche aufgrund der zunehmenden Zerspanbarkeit von Werkstoffen hin zu einer Gradientenstruktur mit harter Oberfläche und zähem Kern entwickelt. Durch Wärmebehandlung lässt sich die Härteverteilung des Schneidwerkzeugs anpassen, und die Lösungsglühung erhöht die Hitzebeständigkeit. Beim Nachschleifen des Werkzeugs ermöglicht die Wolframlegierungsmatrix mehrere Schärfvorgänge. Hinsichtlich der Umweltverträglichkeit bleibt sie beim Trockenschneiden oder mit minimaler Schmierung stabil.

### 7.2.3 Wolframlegierungsbleche für mechanische Gegengewichte

Wolframlegierungsbleche in mechanischen Gegengewichten nutzen ihre hohe Dichte, um eine Massenkonzentration auf engstem Raum zu erreichen. Dies hilft Präzisionsmaschinen, ihren Schwerpunkt anzupassen, die Trägheit auszugleichen und Vibrationen zu reduzieren. Diese Anwendung findet sich häufig in Analysegeräten, Trägheitsnavigationssystemen und optischen Plattformen. Die Gegengewichtsbleche werden präzisionsgefertigt, in spezifische Formen gebracht und in die mechanische Struktur eingebettet oder mit ihr verklebt. Die gleichmäßige Dichte der Wolframlegierungsbleche gewährleistet eine kontrollierbare Massenverteilung und verhindert, dass lokale Abweichungen die Systemstabilität beeinträchtigen.

In Analysenwaagen und Zentrifugen werden Wolframlegierungsbleche als Gewichte oder Gegengewichte eingesetzt. Ihre gleichmäßige Dicke ermöglicht eine präzise Justierung, und die Oberflächenbeschichtung verhindert, dass Oxidation die Masse beeinflusst. In Trägheitsinstrumenten dienen Gegengewichte der Justierung des Trägheitsmoments; die gute Bearbeitbarkeit von Wolframlegierungsblechen erlaubt komplexe Geometrien und erfüllt somit die Anforderungen der Miniaturisierung. Optische Instrumentenplattformen nutzen Gegengewichte zur Schwingungsdämpfung; hochdichte Bleche senken den Schwerpunkt und verbessern die Stoßfestigkeit.

Wolframlegierungsbleche finden auch in schnell rotierenden Maschinen wie Gyroskopen oder Motorrotoren Anwendung, wo der Gegengewichtsausgleich exzentrische Schwingungen reduziert und die Lagerlebensdauer verlängert. Es sind Bleche in verschiedenen Stärken erhältlich, von dünnen Blechen für Mikrogeräte bis hin zu dickeren Blechen für großflächige Massenverstellungen. Oberflächenbehandlungen wie Vergoldung verbessern Aussehen und Korrosionsbeständigkeit, während die chemische Stabilität eine gleichbleibende Qualität über lange Zeiträume gewährleistet.

Die Verarbeitungstechnologie beeinflusst die Genauigkeit der Anwendung; präzises Scheren gewährleistet glatte Kanten, und thermisches Glätten erhält die Planheit. Der Einsatz von Wolframlegierungsblechen in Gegengewichten fördert eine kompakte Bauweise, und der Ersatz herkömmlicher Materialien durch hochdichte Bleche reduziert das Volumen. Hinsichtlich der Umweltverträglichkeit zeigt das Material Dimensionsstabilität bei Temperaturschwankungen und ist für den Betrieb in einem breiten Temperaturbereich geeignet.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 7.3 Anwendungen von Wolframlegierungsblechen im Nuklear- und Medizinbereich

Wolframlegierungsbleche werden in der Nuklear- und Medizintechnik vor allem aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer hervorragenden Strahlungsdämpfung und ihrer Biokompatibilität eingesetzt. Zu ihren Anwendungsgebieten zählen die Abschirmung von Kernkraftwerken, medizinische Strahlentherapiegeräte und Komponenten für die nukleare Umgebung. Sie tragen zum Strahlenschutz und zur Verbesserung der Behandlungsgenauigkeit bei. Wolframlegierungsbleche bieten den Vorteil einer effektiven Abschirmdicke durch ihren hohen Wolframgehalt. Dies führt zu einem geringeren Volumen im Vergleich zu herkömmlichen Materialien und macht sie ideal für Anwendungen mit begrenztem Platzangebot. In der nuklearen Abschirmung werden Wolframlegierungsbleche für Behälterauskleidungen oder Kollimationsstrukturen verwendet, während sie in der Medizin häufig in Lamellenkollimatoren und Schutzausrüstung zum Einsatz kommen. Komponenten für die nukleare Umgebung nutzen ihre thermische Stabilität und Strahlungsbeständigkeit.

Bei der Anwendungsentwicklung wird besonderer Wert auf gleichmäßige Dicke und glatte Oberfläche gelegt. Dünne Bleche dienen der präzisen Kollimation, während dickere Bleche die Struktur stützen. Oberflächenbehandlungen wie Beschichtungen verbessern die Korrosionsbeständigkeit, und Verbundstrukturen in Kombination mit Polymeren ermöglichen flexible Abschirmungen. Die gute Bearbeitbarkeit von Wolframlegierungsblechen erlaubt komplexe Formgebungsverfahren für kundenspezifische Anforderungen. Mit der Weiterentwicklung von Nuklearmedizin- und Strahlentherapie Technologien erweitert sich das Anwendungsgebiet von Wolframlegierungsblechen von der traditionellen Abschirmung hin zur funktionalen Integration, beispielsweise in Kombination mit Sensoren oder Kühlkanälen. Biokompatibilität gewährleistet die Sicherheit in medizinischen Anwendungen, und die Gewebestabilität unter Strahlung unterstützt den Langzeiteinsatz.

#### 7.3.1 Wolframlegierungsbleche für die nukleare Abschirmung

Wolframlegierungsbleche werden aufgrund ihrer hohen Absorptionsfähigkeit für Gammastrahlen und Neutronen in der nuklearen Abschirmung eingesetzt. Sie finden häufig Verwendung in der Auskleidung von Behältern in kerntechnischen Anlagen, in den Innenwänden von Transportbehältern und in der Abschirmung von Versuchsanlagen. Dadurch werden Strahlungsleckagen reduziert und die Betriebsumgebung geschützt. Die hohe Dichte der Wolframlegierungsbleche ermöglicht eine effektive Abschirmung mit geringer Dicke, was im Vergleich zu anderen Materialien zu erheblichen Volumeneinsparungen führt und sie für modulare Konstruktionen prädestiniert. In Abschirmstrukturen werden Wolframlegierungsbleche durch Laminierung oder Spiegelmontage befestigt. Oberflächenbehandlungen verbessern ihre Beständigkeit gegen Strahlungsoxidation.

In Lagerbehältern für radioaktive Abfälle dienen Wolframlegierungsbleche als Auskleidung zur Absorption hochenergetischer Strahlung und gewährleisten so die thermische Stabilität über lange Zeiträume. Experimentelle Aufbauten, wie beispielsweise die Perimeterschutzwände von Reaktoren, verwenden Wolframlegierungsplatten, deren Dicke an die Strahlungsintensität angepasst wird; ein gleichmäßiges Mikrogefüge sorgt für eine konsistente Dämpfung. Die gute Bearbeitbarkeit der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframlegierungsbleche ermöglicht unregelmäßige Schnitte und somit die Anpassung an komplexe Geometrien. In Verbundwerkstoffen verbessert die Kombination mit Boridmaterialien die Neutronenabsorption, wobei eine gute chemische Kompatibilität und das Ausbleiben schädlicher Reaktionen gewährleistet sind. Auch in Anlagen zur Kernbrennstoffverarbeitung kommen Wolframlegierungsbleche zum Einsatz, wo sie Betriebsfenster oder Roboterarmkomponenten abschirmen und so Strahlungsbeständigkeit gegenüber wiederholter Bestrahlung bieten. Oberflächenbeschichtungen, beispielsweise aus Nickel, schützen die Bindungsphase und verlängern die Lebensdauer. Der Einsatz von Wolframlegierungsblechen in der nuklearen Abschirmung fördert die Miniaturisierung von Anlagen, die Gewichtsoptimierung und den einfacheren Transport. Hinsichtlich der Umweltverträglichkeit weisen sie unter Hochtemperaturstrahlung Dimensionsstabilität auf.

### 7.3.2 Wolframlegierungsblech für medizinische Abschirmungen

Wolframlegierungsbleche werden in der medizinischen Abschirmung hauptsächlich in Strahlentherapiegeräten und Schutzkleidung eingesetzt. Dank ihrer Absorptionseigenschaften für Röntgen- und Gammastrahlen ermöglichen sie eine präzise Strahlungsformung und schützen das Personal, wodurch die Behandlungspositionierung und die Sicherheit verbessert werden. Das typischste Beispiel für medizinische Abschirmung sind die Lamellenkollimatoren von Linearbeschleunigern. Mehrere Lagen Wolframlegierungsbleche sind übereinander gestapelt und bewegen sich unabhängig voneinander, um das Strahlprofil zu formen. Eine gleichmäßige Dicke gewährleistet scharfe Kanten und reduziert den Halbschatten.

In radiologischen Diagnosegeräten wie CT-Scannern werden Wolframlegierungsbleche in Detektorkollimationsgittern oder Streulichtplatten eingesetzt, um Streustrahlung zu absorbieren und die Bildschärfe zu verbessern. In Schutzausrüstungen wie Radiologenschürzen oder Abschirmvorhängen werden Wolframlegierungsbleche mit Polymeren zu flexiblen Materialien kombiniert, die als Alternative zu herkömmlichen schweren Materialien einen leichten und komfortablen Tragekomfort bieten. Die Biokompatibilität und Ungiftigkeit von Wolframlegierungsblechen gewährleisten einen sicheren medizinischen Kontakt. Das Anwendungsdesign legt Wert auf Präzision; polierte Klingenoberflächen reduzieren die Reibung und gewährleisten eine reibungslose Bewegung. Die thermische Stabilität der Wolframlegierungsbleche ermöglicht es ihnen, auch unter hoher Strahlungsdosis ihre Form zu behalten, während ihre chemische Inertheit Korrosion durch das Kühlmittel verhindert. Angepasste Blechdicken sind für unterschiedliche Strahlungsenergien geeignet: dünne Bleche für niederenergetische Röntgenstrahlung und dickere Bleche für hochenergetische Gammastrahlung. Die Verbundstrukturen werden auch für tragbare Schutzausrüstungen eingesetzt, wobei gleichmäßig verteilte Mikro-Bleche aus Wolframlegierung eine umfassende Abdeckung bieten.

### 7.3.3 Wolframlegierungsbleche für nukleare Umgebungen

Wolframlegierungsbleche werden in nuklearen Umgebungen aufgrund ihrer Strahlungsbeständigkeit und thermomechanischen Stabilität eingesetzt. Sie finden Anwendung in internen Komponenten kerntechnischer Anlagen, wie Kühlkörpern, Tragstrukturen oder lokaler Abschirmung, und tragen so

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zum zuverlässigen Betrieb der Anlagen unter Strahlungs- und Hochtemperaturbedingungen bei. Komponenten in nuklearen Umgebungen sind Neutronen- und Gammastrahlung sowie Temperaturzyklen ausgesetzt; die Mikrostrukturstabilität der Wolframlegierungsbleche reduziert Schwellung und Versprödung, und die Binderphase sorgt für eine gleichmäßige Spannungsverteilung.

In Kernreaktoren und -beschleunigern werden Wolframlegierungsbleche als Targetrückwände oder Kühlkanalauskleidungen eingesetzt. Ihre Wärmeleitfähigkeit trägt zur Wärmeableitung bei und gewährleistet die Dimensionsstabilität unter Strahlung. Tragkonstruktionen wie Montagehalterungen zeichnen sich durch hohe Festigkeit aus, um Vibrationen und thermischen Belastungen standzuhalten. Die gute Bearbeitbarkeit der Wolframlegierungsbleche ermöglicht eine präzise Formgebung und macht sie somit ideal für den Einbau in beengten Räumen.

Die Anwendungsbereiche erstrecken sich auf Komponenten nuklearer Instrumente, wo Wolframlegierungsbleche als Absorber oder Kollimatorfenster dienen und Strahlungsdämpfung mit Wärmemanagement kombinieren. Oberflächenbehandlungen verbessern die Oxidationsbeständigkeit, und Beschichtungen schützen vor Langzeitstrahlung. Der Einsatz von Wolframlegierungsblechen in nuklearen Umgebungen fördert die Langlebigkeit der Anlagen und reduziert den Wartungsaufwand. Chemische Stabilität schützt vor Reaktionen mit den Medien.

#### **7.4 Anwendungen von Wolframlegierungsblechen in der Elektronik und im Bereich neuer Energien**

Wolframlegierungsbleche werden in der Elektronik und im Bereich neuer Energien vor allem aufgrund ihrer hervorragenden thermischen und elektrischen Leitfähigkeit, ihres angepassten Wärmeausdehnungskoeffizienten und ihrer hohen Dichte eingesetzt. Ihre Anwendungsmöglichkeiten umfassen die Wärmeableitung von Leistungselektronikbauteilen, die Elektronikgehäusefertigung und Elektrodenmaterialien. Dadurch tragen sie zur Miniaturisierung von Bauelementen, zu hoher Zuverlässigkeit und effizienter Energieumwandlung bei. Wolframlegierungsbleche, insbesondere durch Wolfram-Kupfer- oder Wolfram-Nickel-Kupfer-Systeme, weisen ein ähnliches Wärmeausdehnungsverhalten wie Halbleitermaterialien auf und reduzieren so thermische Spannungsrisse. In Substraten zur Wärmeableitung dienen sie als Kühlkörper; in Gehäusen werden sie als Hüllen oder Übergangsschichten eingesetzt; und in Elektroden bieten sie Schutz vor Lichtbogenerosion. Mit der rasanten Entwicklung von 5G-Kommunikation, Hochleistungselektronik und neuen Batterietechnologien hat sich der Anwendungsbereich von Wolframlegierungsblechen von traditionellen Vakuumbauteilen auf Hochfrequenzmodule und Energiespeichersysteme ausgeweitet.

Die Elektronikindustrie benötigt ein präzises Wärmemanagement. Wolframlegierungsbleche mit ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit ermöglichen eine optimale Wärmeableitung, während Oberflächenbeschichtungen die Lötbarkeit verbessern. In Anwendungen im Bereich neuer Energien gewährleisten sie Stabilität unter hohen Temperaturen und zyklischen Belastungen. Wolframlegierungsbleche bieten flexible Dickenoptionen: Dünne Bleche werden in der Mikroelektronik eingesetzt, während dickere Bleche hohe Leistungen ermöglichen. Verbundstrukturen sind üblich und

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

werden mit Keramik oder Diamant kombiniert, um die Leistung zu steigern. Der Einsatz von Wolframlegierungsblechen fördert zudem die Geräteintegration, da passende Wärmeleitmaterialien den Kontaktwärmewiderstand reduzieren. Wolframlegierungsbleche sind umweltbeständig und weisen über einen weiten Temperaturbereich eine stabile Leistung auf. Zusammenfassend demonstriert diese Anwendung die thermoelektrische Funktion von Wolframlegierungsblechen in der Elektronik für neue Energien. Sie trägt durch Kombinationen von Eigenschaften zu Verbesserungen der Geräteeffizienz und -lebensdauer bei und unterstützt kontinuierliche technologische Fortschritte in der Branche.

#### 7.4.1 Wolframlegierungsblech als Wärmeableitungssubstrat

Wolframlegierungsbleche in Wärmeableitungssubstraten nutzen vor allem die hohe Wärmeleitfähigkeit des Wolfram-Kupfer-Systems und dessen Kompatibilität mit der Wärmeausdehnung von Halbleitermaterialien. Diese Anwendung ist gängig bei Hochleistungs-LEDs, Lasern und HF-Modulen und trägt zur schnellen Wärmeableitung und Reduzierung von Spannungsrissen bei. Als Zwischenschicht zwischen Chip und Kühlkörper bietet das Wolframlegierungsblech eine ebene Auflagefläche, und die Nickel-Gold-Beschichtung verbessert die Lötbarkeit und sorgt für eine hohe chemische Bindungsstärke. In der Wolfram-Kupfer-Pseudolegierungsstruktur bildet die Kupferphase durchgehende Wärmekanäle, während das Wolframgerüst die Ausdehnung kontrolliert und sich so an Silizium- oder Galliumarsenid-Substrate anpasst.

In Leistungsverstärkermodule dienen Wolframlegierungssubstrate als Träger für den Chip. Ihre Wärmeleitfähigkeit ermöglicht die Wärmeableitung und -ansammlung während des Hochfrequenzbetriebs, während die gleichmäßige Dicke für Planheit sorgt und Verformungen minimiert. In Laserdiodenanwendungen absorbiert das Substrat die Pumpwärme, und die Wärmekapazität des Wolframlegierungsblechs puffert kurzzeitige Spitzenwerte ab. In der LED-Gehäusetechnik, insbesondere im Bereich der Hochleistungsbeleuchtung, ersetzen Wolframlegierungsbleche herkömmliche Kupfer-Molybdän-Bleche und bieten ein überlegenes volumetrisches Wärmemanagement.

Das Anwendungsdesign legt Wert auf die Behandlung der Schnittstellen, wobei Chips durch Löten oder Sintern verbunden werden und chemische Kompatibilität zur Vermeidung reaktiver Schichten gewährleistet ist. Die Laserbearbeitung der Oberflächenmikrostrukturen vergrößert die Kontaktfläche und verbessert die Wärmeleitfähigkeit. Wolframlegierungsbleche im Wärmeableitungssubstrat fördern die Miniaturisierung der Bauelemente und gewährleisten einen zuverlässigen Betrieb bei hohen Leistungsdichten. Kompositvarianten mit Diamantpartikeln verbessern die Wärmeleitfähigkeit und erweitern so deren Grenzen. Hinsichtlich der Umweltverträglichkeit zeigt das System auch bei hohen und niedrigen Temperaturen ein stabiles Verhalten.

#### 7.4.2 Wolframlegierungsbleche für die Elektronikverpackung

Wolframlegierungsbleche werden in der Elektronikgehäuseindustrie aufgrund ihrer guten Wärmeausdehnung und hohen Dichte eingesetzt. Sie dienen als Gehäuse, Abdeckungen oder

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Übergangsschichten und gewährleisten so einen hermetischen Schutz und Wärmeleitfähigkeit. Diese Anwendung findet sich in hochzuverlässigen Mikrowellengeräten und Sensorgehäusen, wo sie zur Aufrechterhaltung eines internen Vakuums oder einer Inertgasatmosphäre beitragen. Wolframlegierungsbleche sind mit Keramik- oder Glasdichtungen kompatibel, ihre chemische Stabilität ermöglicht das Hochtemperaturlöten, und ihr ähnlicher Wärmeausdehnungskoeffizient reduziert die Dichtungsspannung.

In der Leistungshalbleiter-Gehäusetechnik dienen Wolframlegierungsbleche als Basis oder Leadframe-Übergänge. Sie leiten die Wärme von den Sperrschichten ab und reduzieren dank ihrer hohen Dichte das Gesamtgewicht. In Mikrowellenröhrengehäusen gewährleisten Wolframlegierungs-Abdeckplatten die elektromagnetische Abschirmung, und ihre hohe Dichte erhöht die strukturelle Steifigkeit. Sensorgehäuse nutzen Wolframlegierungsbleche für Korrosionsbeständigkeit, und Oberflächenbeschichtungen verbessern die Lötbarkeit.

### 7.4.3 Wolframlegierungsblech für Elektroden

Wolframlegierungsbleche in Elektroden nutzen vor allem ihre Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion und ihre hohe Leitfähigkeit. Diese Anwendung findet sich in Hochspannungsschaltern, Widerstandsschweißelektroden und bestimmten Entladungsröhren und trägt zur Verlängerung der Kontaktlebensdauer und zur Aufrechterhaltung einer stabilen Leitfähigkeit bei. Als Kontaktflächen oder -einsätze widersteht die Wolframphase dem Schweißen, während die Kupfer- oder Silberphase einen leitfähigen Pfad bildet. Chemisch gesehen verflüchtigen sich die Ablationsprodukte und führen thermische Schäden ab.

Bei Widerstandsschweißelektroden werden Wolframlegierungsbleche in ein Kupfersubstrat eingebettet, um wiederholten Punktschweißvorgängen standzuhalten. Ihre hohe Härte reduziert Verformungen, während ihre Leitfähigkeit hohe Ströme ermöglicht. In Vakuumschalteranwendungen ist die Wolframlegierungselektrode dem Lichtbogen zugewandt; ihr Ablationswiderstand sorgt für eine glatte Kontaktfläche und minimiert Materialverluste.

Die Anwendungsbereiche haben sich auf Elektroden für die Funkenerosion erweitert. Wolframlegierungsbleche reduzieren den Verschleiß und verbessern die Bearbeitungseffizienz, während eine optimierte Oberflächenstruktur eine gleichmäßige Entladung gewährleistet. Die Elektroden der Entladungsröhren verwenden Wolframlegierungen, die Hochspannungsdurchschlägen standhalten und durch ihre Stabilität wiederholte Entladungen ermöglichen.

Wolframlegierungsbleche in den Elektroden verbessern die Kontaktsicherheit und Lebensdauer, während die Verbundkonstruktion ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Leitfähigkeit und Verschleißfestigkeit gewährleistet. Die Dicke wird anhand der Stromstärke bestimmt; dünnere Bleche ermöglichen einen präzisen Kontakt, während dickere Bleche eine robuste Unterstützung bieten. Die Oberflächenpolitur reduziert den Anfangswiderstand.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 7.5 Anwendung von Wolframlegierungsblechen in Karten

Wolframlegierungsbleche in Karten nutzen vor allem ihre hohe Dichte, die für eine angenehme Haptik und einen metallischen Glanz sorgt, sowie für hervorragende Verarbeitbarkeit und Verschleißfestigkeit. Diese Anwendung kombiniert funktionale Materialien mit Alltagsgegenständen und verleiht Karten eine einzigartige Textur und Langlebigkeit. Wolframlegierungsbleche werden präzise zu dünnen Folien oder Verbundschichten gewalzt und anschließend mit Kunststoff- oder Metallsubstraten laminiert. Die Dickenkontrolle gewährleistet die Kompatibilität mit Standardkartengrößen. Anwendungsbereiche sind Bankkarten, Tierkennzeichnungsmarken und Gedenk- und Weihnachtskarten, die der Verbrauchernachfrage nach hochwertigen, personalisierten und langlebigen Produkten gerecht werden.

Wolframlegierungsbleche verleihen Karten fälschungssichere Oberflächenstrukturen und optische Effekte. Polierte oder gebürstete Oberflächen verbessern die Ästhetik, während Beschichtungen wie Gold oder schwarzes Titan für mehr Farbvieleit sorgen. Dank ihrer chemischen Stabilität sind die Karten widerstandsfähig gegen alltägliche Abnutzung und Korrosion und behalten ihren Glanz lange. Im Verbundverfahren wird die Wolframlegierungsschicht unter Heißpressung auf ein PVC- oder PC-Substrat aufgebracht, wobei Klebstoffe die Zwischenschichtfestigkeit gewährleisten. Die Verwendung von Wolframlegierungen ermöglicht zudem leichte Kartendesigns, die durch hochdichte, dünne Schichten ein angenehmes Gewicht erzielen, ohne das Volumen zu erhöhen. Mit steigendem Konsum haben sich Wolframlegierungskarten von Luxusartikeln zu personalisierten Geschenken entwickelt, wobei Verarbeitungstechnologien wie die Lasergravur individuelle Designs ermöglichen. Die Karten sind zudem biege- und hitzebeständig.

### 7.5.1 Bankkarten und Zahlungskarten aus Wolframlegierung

Bank- und Zahlungskarten aus Wolframlegierung sind hochwertige Zahlungsmittel, deren Kartenkörper aus dünnen Wolframlegierungsfolien besteht. Durch die Wolframlegierungsschicht fühlen sich die Karten angenehm schwer und kühl an, wodurch sie sich von herkömmlichen Plastikkarten unterscheiden und das Nutzererlebnis verbessern. Die Wolframlegierungsfolie wird typischerweise zu einer extrem dünnen Folie ausgewalzt, anschließend mit mehreren Schichten Kunststoffsubstrat heißverpresst und mit einer transparenten Schutzschicht überzogen. Die chemische Beständigkeit der Wolframlegierung gewährleistet, dass die Karte auch bei täglicher Reibung und Biegung nicht verblasst oder sich verformt. Die Standardkartengröße ist mit gängigen Kartenlesegeräten kompatibel, und der integrierte Chip sowie der Magnetstreifen beeinträchtigen die Funktionalität nicht.

Bankkarten aus Wolframlegierung werden von Finanzinstituten häufig als exklusive Mitgliedskarten oder sogenannte „Black Cards“ ausgegeben. Ihr Gewicht verleiht der Karte beim Abheben einen Hauch von Eleganz, während der metallische Glanz die Optik aufwertet. Verschiedene Oberflächenbehandlungen, darunter gebürstete Texturen und Hochglanzpolitur, sowie die Lasergravur von Kartennummer und Design bieten hervorragenden Fälschungsschutz. Die Dicke der Wolframlegierungsschicht ist präzise abgestimmt, um ein optimales Verhältnis von Gewicht und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Flexibilität zu erzielen. Biegetests gewährleisten die Abwesenheit von Delamination. Chemische Beschichtungen wie Roségold oder Gunmetal bieten Farboptionen für individuelle Vorlieben.

Zahlungskartenanwendungen werden zunehmend durch kontaktloses Bezahlen erweitert. Wolframlegierungen stören keine Funksignale, und das Design der Antennenschicht ist kompatibel. Ihre Abriebfestigkeit sorgt dafür, dass die Karten auch bei Reibung im Portemonnaie wie neu aussehen, und ihre lange Lebensdauer reduziert die Austauschhäufigkeit. Die Verarbeitungstechnologie für Wolframlegierungskarten ist ausgereift und ermöglicht präzise geschnittene, glatte und gratfreie Kanten nach der Laminierung. Die Karten sind beständig gegen hohe Temperaturen und chemische Reinigungsmittel und eignen sich daher für den weltweiten Einsatz. Der Einsatz von Wolframlegierungen verbessert zudem die Technologie zur Fälschungssicherheit von Karten; ihre einzigartige Dichte macht sie schwer zu imitieren.

### 7.5.2 Haustier-Identifikationsanhänger aus Wolframlegierung

Wolframlegierungs-Hundemarken sind kleine Anhänger aus dünnen Wolframlegierungsblechen, die zur Kennzeichnung von Haustieren am Halsband dienen. Dank ihrer hohen Dichte und metallischen Textur vereinen sie Langlebigkeit und Ästhetik und sind widerstandsfähig gegen Abnutzung und Korrosion durch die Aktivitäten des Tieres. Die Wolframlegierungsbleche werden dünn gewalzt und anschließend in verschiedene Formen wie Knochen, runde Anhänger oder Herzen geprägt. Die Oberfläche wird per Laser mit den Besitzerinformationen und dem Namen des Tieres graviert. Die chemische Härte der Wolframlegierung sorgt für eine tiefe, dauerhafte und abriebfeste Gravur.

Für die Kennzeichnung von Haustieren bietet die Wolframlegierung ein moderates Gewicht, das die Belastung für das Tier minimiert. Der Verschluss sorgt für sicheren Halt und verhindert ein Ablösen. Polierte oder gebürstete Oberflächen reflektieren das Licht und verbessern so die Sichtbarkeit. Beschichtungsoptionen wie schwarzes Rhodium oder Gold bieten eine vielfältige Farbauswahl. Die chemische Beständigkeit gewährleistet, dass die Marke auch bei Regen, Schlamm oder dem Ablecken durch das Tier intakt bleibt, ohne zu rosten oder auszubleichen. Die kontrollierte Dicke sorgt dafür, dass sie dünn und dennoch robust ist und sich nicht verbiegt oder bricht. Die Anwendung hat sich auf den Markt für hochwertige Heimtierprodukte ausgeweitet, wobei Platten aus Wolframlegierung als luxuriöse Accessoires dienen. Diese Platten werden mit Lederhalsbändern kombiniert und sind mit individuellen Designs versehen, darunter Umrisse von Haustierfotos oder QR-Code-Links. Ihre Langlebigkeit ermöglicht das Tragen durch aktive Haustiere über lange Zeit, und die gut sichtbaren Informationen erleichtern das Wiederfinden im Verlustfall. Die Bearbeitbarkeit der Wolframlegierungsplatten erlaubt die Personalisierung in Kleinserien, und die abgerundeten Kanten verhindern Verletzungen der Tierhaut.

### 7.5.3 Personalisierte Feiertags- und Gedenkkarten aus Wolframlegierung

Personalisierte Grußkarten aus Wolframlegierung werden aus dünnen Wolframlegierungsblechen gefertigt und eignen sich als Weihnachtsgeschenke oder Souvenirs. Durch ihr metallisches Gewicht und ihren dauerhaften Glanz vermitteln diese Karten besondere Emotionen und besitzen Sammlerwert,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

wodurch sie sich von Karten aus Papier oder Plastik abheben. Die aus Verbund- oder Reinmetall-Wolframlegierungsblechen hergestellten Karten werden per Laser mit Grüßen, Daten oder Motiven graviert. Die chemische Stabilität der Wolframlegierung garantiert, dass die Informationen nicht verblassen und die Karten somit ideal zur langfristigen Aufbewahrung geeignet sind.

Für Feiertagskarten wie Geburtstags-, Jubiläums- oder Weihnachtskarten bietet Wolframlegierung eine wertige Haptik und eine angenehme Überraschung beim Öffnen. Beschichtungen in Gold oder Silber harmonisieren perfekt mit dem jeweiligen Festtagsthema. Erinnerungskarten eignen sich für Hochzeiten, Schulabschlüsse oder Firmenjubiläen. Individuelle Formen wie Herzen oder Lesezeichen sowie eingelegte Edelsteine oder geprägte Designs unterstreichen ihren künstlerischen Wert. Dünn und dennoch robust, lassen sie sich leicht versenden oder mitnehmen.

Das Design der Anwendung legt Wert auf Personalisierung: Lasertechnologie ermöglicht feine Texturen, und chemisches Polieren sorgt für einen spiegelähnlichen Glanz und damit für eine ansprechende Optik. Die Verbundstruktur, kombiniert mit Seide oder Leder, wertet das Geschenk auf. Dank der Verschleißfestigkeit der Wolframlegierung behalten die Karten auch bei häufigem Gebrauch ihr makelloses Aussehen und erzielen so einen hohen Sammlerwert.

#### **7.5.4 Beschilderung für die Wolframlegierungsindustrie und das Anlagenmanagement**

Industrielle und Anlagenmanagement-Beschilderungen aus Wolframlegierungen werden aus dünnen Wolframlegierungsblechen zu robusten Schildern für die dauerhafte Kennzeichnung von Geräten, Werkzeugen oder Anlagen verarbeitet. Dank ihrer hohen Härte und chemischen Stabilität sind diese Schilder verschleiß-, korrosions- und temperaturbeständig und gewährleisten so die langfristige Lesbarkeit der Informationen. Nach dem Walzen zu dünnen Platten werden die Wolframlegierungsbleche per Laser graviert oder mit Zahlen, Barcodes oder QR-Codes gestempelt. Durch Polieren oder Bürsten der Oberfläche wird die Witterungsbeständigkeit erhöht. Die chemische Inertheit der Wolframlegierung verhindert Korrosion durch Säuren, Laugen oder Öle und macht sie somit ideal für den Einsatz im Freien oder in chemischen Umgebungen.

In der industriellen Beschilderung werden Schilder aus Wolframlegierung an Maschinen, Rohren oder Behältern befestigt und sind vibrations- und reinigungsbeständig. Ihre hohe Dichte sorgt für Stabilität, und sie werden sicher mit Fangbändern oder Nieten angebracht. Beschilderungen zur Anlagenverwaltung kommen an Lagerregalen oder IT-Geräten zum Einsatz. QR-Codes verknüpfen die Schilder mit digitalen Systemen zur Nachverfolgung und Bestandsverwaltung. Die Verschleißfestigkeit der Wolframlegierung gewährleistet, dass die Schilder auch bei häufigem Scannen oder Reibung klar und die Informationen lesbar bleiben.

Das Design der Anwendung legt Wert auf Praktikabilität und zeichnet sich durch glatte, kratzfeste Kanten sowie präzise Bohrungen für eine einfache Montage aus. Das dünne und dennoch robuste Material ist biege- und bruchfest. Die schwarze Chrombeschichtung sorgt für optimale Unauffälligkeit und schützt vor Fingerabdrücken. Dank seiner chemischen Beständigkeit ist die Reinigung mit

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



Hochdruckwasserstrahl oder Lösungsmittel möglich. Die gute Bearbeitbarkeit der Namensschilder aus Wolframlegierung ermöglicht eine individuelle Massenfertigung, und vorgefertigte Muster reduzieren die Kosten.

#### 7.5.5 Etiketten für Kleidung und Luxusgüter aus Wolframlegierung

Anhängeetiketten aus Wolframlegierung für Kleidung und Luxusmarken sind Modeetiketten aus dünnen Wolframlegierungsblechen, die an Kleidung, Taschen oder Schmuck angebracht werden. Sie verleihen den Produkten eine edle Haptik und ein hochwertiges Image. Durch ihr Gewicht und ihren Glanz werben diese Anhängeetiketten das Markenimage auf und heben sich so von herkömmlichen Etiketten aus Kunststoff oder Papier ab. Die Wolframlegierungsbleche werden präzise zu Markenlogos oder geometrischen Formen geschnitten und mit gebürsteten, spiegelnden oder vergoldeten Oberflächen versehen. Die chemische Härte der Wolframlegierung sorgt dafür, dass die Anhängeetiketten auch bei starker Beanspruchung nicht zerkratzen oder sich verformen und ihren Glanz dauerhaft behalten.

Bei Bekleidungsanhängern werden Wolframlegierungsanhänger mit dünnen Ketten oder Bändern an den Kleidungsstücken befestigt. Ihr Gewicht vermittelt ein Gefühl von Luxus. Die Lasergravur des Markennamens oder der Nummer der limitierten Auflage unterstreicht die Exklusivität. Anhänger für Luxushandtaschen sind oft größer, ihre geprägten Strukturen erzeugen einen dreidimensionalen Effekt, und sie sind mit schwarzem Titan oder Roségold beschichtet, um farblich zum Produkt zu passen. Schmuckanhänger bestehen aus korrosionsbeständigen Wolframlegierungen und gewährleisten so die langfristige Aufbewahrung von Edelmetallschmuck. Das Design der Applikation vereint Ästhetik und Funktionalität: Abgerundete, polierte Kanten und präzise gefertigte Löcher verhindern Einreißen und Brechen. Die fein abgestimmte Dicke sorgt für ein ausgewogenes Verhältnis von Gewicht und Weichheit, während die chemische Beständigkeit den korrosiven Einflüssen von Parfüm und Schweiß widersteht. Dank der guten Bearbeitbarkeit der Wolframlegierung lassen sich Kleinserien mit hochwertiger Individualisierung realisieren, wobei 3D-Texturen oder Edelsteineinlagen den künstlerischen Wert zusätzlich steigern.

#### 7.5.6 Hochwertige Visitenkarten und Benimmkarten aus Wolframlegierung

Wolframlegierung werden aus dünnen Wolframlegierungsblechen gefertigt und eignen sich für geschäftliche oder private Anlässe. Durch ihr metallisches Gewicht und die exquisite Verarbeitung vermitteln diese Karten Professionalität und Stil und heben sich so von herkömmlichen Papiervisitenkarten ab. Sie unterstreichen das persönliche Image des Inhabers. Die Wolframlegierungsbleche werden auf die Standarddicke für Visitenkarten gewalzt und anschließend per Laser mit Name, Titel und Kontaktdaten graviert. Die chemische Härte der Wolframlegierung sorgt dafür, dass die Karte auch bei Reibung an einem Portemonnaie oder Visitenkartenetui nicht knickt oder abnutzt und dauerhaft ihren Glanz behält.

Bei hochwertigen Visitenkarten sorgt Wolframlegierung für eine edle, metallische Haptik, die sofort ins Auge fällt. Die Beschichtung, beispielsweise in Gunmetal oder Silberweiß, unterstreicht einen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

professionellen Stil, während die gebürstete Oberfläche dezenten Luxus verleiht. Visitenkarten für gesellschaftliche Anlässe wie Hochzeiten, als Dankeskarten oder formelle Einladungen zeichnen sich durch elegante Schriftarten und Designs aus, sind dünn und dennoch wertig und lassen sich leicht versenden oder zustellen.

Das Design der Anwendung besticht durch Liebe zum Detail: Abgeschrägte Kanten verhindern Kratzer, und QR-Codes verlinken zu persönlichen Websites oder digitalen Visitenkarten. Die chemische Beständigkeit schützt vor Schweiß- und Alkoholflecken und gewährleistet so klare und dauerhafte Informationen. Dank der Bearbeitbarkeit der Wolframlegierungskarten ist eine beidseitige Gravur möglich – eine Seite für Informationen, die andere für künstlerische Designs – was ihren Sammlerwert erhöht.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsbleche

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Kapitel 8 Häufige Probleme und Lösungen für Wolframlegierungsbleche

### 8.1 Grundlegende Materialfragen und Lösungsansätze für Wolframlegierungsbleche

Bei Wolframlegierungsblechen treten hauptsächlich Abweichungen in der Zusammensetzungsverteilung, der Kristallstruktur und den physikalischen Eigenschaften auf. Diese Probleme können die Gleichmäßigkeit, Zuverlässigkeit und Funktionalität des Materials während der Produktion und Anwendung beeinträchtigen. Zusammensetzungsinhomogenitäten führen zu lokalen Leistungsunterschieden, Strukturdefekte beeinflussen das mechanische Verhalten, und Abweichungen in den physikalischen Eigenschaften können zu einer unzureichenden Anpassung an nachfolgende Anwendungen führen. Lösungsansätze konzentrieren sich auf die Prozessoptimierung und -steuerung, wie z. B. die Homogenisierung der Mischung, die Korrektur von Wärmebehandlungsfehlern und die Anpassung von Parametern. Die Ursachen dieser Probleme hängen oft mit den Pulvereigenschaften, der Sinterkinetik und den Verarbeitungsspannungen zusammen und können durch systematische Erkennungs- und Feedbackmechanismen wirksam minimiert werden.

Die Lösung grundlegender Materialprobleme setzt auf eine Kombination aus Prävention und Korrektur: Strenge Reinheitskontrolle im Rohmaterialstadium, optimierte Parameter in der Formgebungs- und Sinterphase sowie thermomechanische Kontrolle in der Nachbearbeitung. Chemische Prinzipien leiten die Lösung: Diffusion fördert die Homogenität, während die Wiederherstellung Defekte reduziert. Die Flexibilität der Problemlösung ermöglicht Anpassungen je nach Legierungssystem; bei Nickel-Eisen-Systemen liegt der Fokus auf der Festigkeitsbalance, bei Wolfram-Kupfer-Systemen auf der Wärmeleitfähigkeit. Umwelteinflüsse wie feuchtigkeitsbedingte ungleichmäßige Oxidation können Probleme verstärken und erfordern daher eine kontrollierte Trocknung.

#### 8.1.1 Fragen im Zusammenhang mit Zusammensetzung und Struktur

Wolframlegierungsbleche weisen hauptsächlich eine ungleichmäßige Elementverteilung und Kristallfehler auf. Diese Probleme beeinträchtigen das Zweiphasengleichgewicht und die Grenzflächenbindung des Mikrogefüges und somit die makroskopischen Eigenschaften. Die inhomogene Zusammensetzung resultiert aus unzureichender Pulvermischung oder Sinterdiffusion, während zu den Strukturdefekten Versetzungen, Porosität und segregierte Phasen gehören. Lösungsansätze konzentrieren sich auf Homogenisierungsverfahren und eine regenerative Wärmebehandlung, die chemische Diffusion und Rekristallisationsmechanismen nutzt. Die Fehlererkennung erfolgt mittels Spektralanalyse und Elektronenmikroskopie, wodurch ein frühzeitiges Eingreifen zur Abfallreduzierung ermöglicht wird.

Die Lösung dieser Probleme erfordert auch das koordinierte Funktionieren der gesamten Prozesskette: Optimierung des Pulvers zu Beginn, um anfängliche Abweichungen zu reduzieren, Kontrolle der Diffusion während des mittleren Sinterprozesses und Minimierung von Defekten bei der Endbearbeitung. Die Probleme treten bei hochwolframhaltigen Legierungen stärker hervor, da hier die Homogenität bei

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

geringem Bindemittelanteil schwer aufrechtzuerhalten ist. Auch die Umgebungsbedingungen, wie z. B. die Reinheit der Atmosphäre, beeinflussen den Schweregrad der Probleme.

#### 8.1.1.1 Probleme und Homogenisierungsmethoden inhomogener Wolframlegierungen

Die Hauptursache für Probleme mit Wolframlegierungen sind unzureichende Pulvermischung, ungenügende Sinterdiffusion oder Elementsegregation aufgrund zu großer Rohlinggröße. Diese Ungleichmäßigkeit äußert sich in lokaler Anreicherung der Bindemittelphase oder Agglomeration von Wolframpartikeln, was die Dichteverteilung und das mechanische Gleichgewicht beeinträchtigt. Die Ursachen des Problems zeigen sich bereits in der Mischphase, wo Unterschiede in der Pulverpartikelgröße oder elektrostatische Entladungen zur Trennung führen. Während des Sinterns verstärkt eine ungleichmäßige Strömung der flüssigen Phase die Segregation, und Unterschiede in den Diffusionsgeschwindigkeiten chemisch bindender Elemente verstärken den Gradienten.

Die Homogenisierungsmethode verbessert zunächst die Pulvermischung durch Vorlegierung mittels hochenergetischer Kugelmühle oder Sprühtrocknung, um die Elementmikroverteilung zu fördern. Während des Sinterns wird durch verlängerte Haltezeiten oder segmentierte Temperaturregelung die Elementmigration mittels chemischer Diffusion gesteuert, wodurch der Flüssigphasenfluss für eine gleichmäßige Verteilung optimiert wird. Die Nachbehandlung durch heißisostatisches Pressen (HIP) nutzt anisotropen Druck, um die Eliminierung geschlossenzelliger Strukturen und die Diffusionshomogenisierung zu beschleunigen. Das anschließende Glühen homogenisiert das Pulver weiter, und verlängertes Vakuumhalten ermöglicht die Anpassung der Lösungsglühung.

In der Anwendung werden große Rohlinge in Mehrzonen-Heizöfen kombiniert, um Temperaturgradienten zu reduzieren, während kleine Rohlinge gerührt werden, um die Konvektion zu verbessern. Chemische Analysemethoden wie die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDS) dienen der Identifizierung inhomogener Bereiche und der Optimierung der Parameter. Zu den vorbeugenden Maßnahmen gehören die Pulvervorbehandlung zur Entfernung von Agglomeraten und die Feinabstimmung der Mischungsverhältnisse zur Verbesserung der Fließfähigkeit.

Dieses Problem tritt häufig bei Legierungen mit hohem Wolframgehalt auf. Durch Homogenisierung wird die Grenzflächenhaftung verbessert und Leistungsabweichungen reduziert. Das Pulver sollte trocken gelagert werden, um Feuchtigkeitsaufnahme und Entmischung zu verhindern. Verfahren wie die mechanische Legierung ermöglichen eine gründliche Vorhomogenisierung.

#### 8.1.1.2 Arten von Kristallstrukturdefekten und Reparaturstrategien

Wolframlegierungsbleche weisen Versetzungen, Porosität, Korngrenzensegregation und anomale Ausscheidungen auf. Diese Defekte entstehen durch Verarbeitungsspannungen und unvollständiges Sintern und beeinträchtigen Festigkeit, Zähigkeit und thermische Stabilität. Versetzungen akkumulieren sich aufgrund von Walzverfestigung, Porosität resultiert aus Restsinterung und unzureichender Dichte, Korngrenzensegregation führt zu einer Anreicherung von Verunreinigungen, und Ausscheidungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



weisen anomale Größe oder ungleichmäßige Verteilung auf. Chemisch gesehen stören die Defekte die Gitterperiode und reduzieren die Bindungsenergie.

Die Reparaturstrategie basiert primär auf Wärmebehandlung, einschließlich Vakuumglühen zur Freisetzung von Versetzungen, chemischer Diffusionsannihilation oder -umlagerung sowie einer Haltezeit zur Wiederherstellung des Gleitsystems. Die Porenreparatur erfolgt durch Hochdruckverschluss mittels heißisostatischem Pressen, gefolgt von einer Verdichtung nach dem Entgasen. Korngrenzensegregation wird durch Reinigung der Rohmaterialien zur Reduzierung der Seigerungsquelle, gefolgt von Hochtemperaturhomogenisierung und Diffusionsverdünnung, behandelt. Anomale Ausscheidungen werden durch schnelles Abkühlen und Erstarren zur Stabilisierung der Homogenität oder durch Alterung zur Größenkontrolle behandelt.

Bei der Anwendung von Verfahren werden Kaltwalzfehler häufig stufenweise durch Zwischenglühen behoben, während Sinterfehler durch Nachbehandlung unter Druck beseitigt werden. Chemische Vakuumatmosphären verhindern die Entstehung neuer Fehler. Elektronenmikroskopie dient der Beobachtung von Fehlertypen und der Auswahl geeigneter Verfahren. Mehrdirektionales Schmieden verhindert gerichtete Versetzungen.

### **8.1.2 Probleme mit Abweichungen der physikalischen Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen**

Wolframlegierungsbleche weisen hauptsächlich anomale Dichte und Härte sowie ein Ungleichgewicht zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnung auf. Diese Abweichungen resultieren aus Prozessschwankungen und Unterschieden in der Zusammensetzung und beeinträchtigen die Anwendungskompatibilität und Zuverlässigkeit. Dichteabweichungen entstehen durch ungleichmäßiges Sintern, anomale Härte durch unzureichende Kaltverfestigung oder Glühung, geringe Wärmeleitfähigkeit durch Entmischung der flüssigen Phase und ein Ungleichgewicht der Wärmeausdehnung durch ein unausgewogenes Bindemittelphasenverhältnis.

Die Lösung konzentriert sich auf Parameterstabilität und Nachjustierung. Die Dichte wird durch Druckkompensation korrigiert, die Härte durch Wärmebehandlung gesteuert und das Wärmeleitfähigkeits-Ausdehnungsverhältnis optimiert. Die Fehlererkennung erfolgt durch Mittelwertbildung aus Mehrpunktmessungen, um Prozessschritte nachzuverfolgen.

#### **8.1.2.1 Ursachen und Korrekturverfahren für anormale Dichte und Härte**

Wolframlegierungsblechen ist unzureichendes Sintern oder ungleichmäßige Verformung während der Verarbeitung. Die geringe Dichte führt zu Restporosität, während die hohe Härte auf Ansammlungen bei der Kaltverformung oder Überglühung zurückzuführen ist. Chemisch gesehen führt dies zu einer Unterbrechung der kontinuierlichen Phase in den Poren und zur Verfestigung von Versetzungen an den Korngrenzen. Die Ursachen lassen sich auf gemischte Entmischung zurückführen, die zu lokalen Unterschieden in der flüssigen Phase und verstärkten Abweichungen im Sintertemperaturfenster führt.

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

Die Einstellung der technischen Dichte konzentriert sich auf das Heißisostatische Pressen zur Erzielung der gewünschten Dichte, während die Hochdruckbehandlung mit geschlossenzelliger Struktur die Gleichmäßigkeit verbessert. Anomale Härte wird durch Glühen oder Aushärtung behoben, wobei chemische Diffusion oder Ausscheidungsgleichgewicht zur Härteverbesserung genutzt werden. Knüppel mit niedriger Dichte werden einem Sekundärsinterprozess unterzogen, während Knüppel mit hoher Härte einer Zwischenglühung zur Härteklassifizierung unterzogen werden.

In technischen Anwendungen werden mehrfache Druckreparaturen eingesetzt, um Dichteanomalien in großen Rohlingen zu beheben, während bei kleineren Werkstücken der Walzprozess feinjustiert wird, um die Härte zu verbessern. Chemische Analysen dienen der Beurteilung des Ausmaßes von Gewichtsverlust- oder Eindruckabweichungen. Dieses Verfahren trägt dazu bei, Probleme im Zusammenhang mit Pulverhomogenität und Parameterstabilität zu vermeiden.

#### **8.1.2.2 Probleme und Optimierungsschemata im Zusammenhang mit der Diskrepanz zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnung**

Die Diskrepanz zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnung von Wolframlegierungsblechen resultiert aus einem Ungleichgewicht in der Verteilung oder dem Anteil der Bindemittelphase. Eine niedrige Wärmeleitfähigkeit deutet auf eine diskontinuierliche Kupferphase hin, während eine hohe Ausdehnung auf einen Überschuss an Bindemittel schließen lässt. Chemisch gesehen hängt die Wärmeleitfähigkeit vom Elektron-Phonon-Transport ab, der durch das Volumen der expandierten Phase bestimmt wird. Das Problem entsteht durch ungleichmäßigen Sinterfluss oder eine falsche Mischungszusammensetzung.

Die optimierte Wärmeleitfähigkeit wird durch Kupferinfiltration oder aktiviertes Sintern verbessert, wodurch kontinuierliche, gleichmäßige chemische Fließkanäle entstehen. Unterschiede in der Wärmeausdehnung werden durch Anpassung des Wolfram-Bindungsverhältnisses ausgeglichen, wobei der Koeffizient durch partielle Molybdänsubstitution feinjustiert wird. Die Wärmebehandlung homogenisiert die Verteilung, und das Glühen fördert die Diffusion an der Grenzfläche.

Bei der Anwendung dieser Lösung wird die Wärmeleitfähigkeit des Wolfram-Kupfer-Systems nach dem Schmelzen und Infiltrieren optimiert, gefolgt vom Walzen zur Kanalbegradigung. Die Ausdehnung des Nickel-Eisen-Systems wird durch Glühen zur Freisetzung kontrolliert. Die Übereinstimmung von Wärmeleitfähigkeitsmessgerät und Dilatometer wird durch optimierte Tests verifiziert.

### **8.2 Probleme und Lösungen bei der Herstellung und Fertigung von Wolframlegierungsblechen**

Bei Wolframlegierungsblechen liegt der Fokus primär auf der Optimierung der gesamten Lieferkette vom Rohmaterial bis zum fertigen Produkt. Zu den Herausforderungen zählen Abweichungen in pulvermetallurgischen Prozessen, Instabilität beim Walzen und Schwierigkeiten bei der Qualitätsprüfung und -kontrolle. Lösungen werden durch die Anpassung von Prozessparametern, die Verbesserung der Anlagen und Qualitätsfeedbackmechanismen erzielt. Fertigungsprobleme resultieren häufig aus

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

Materialeigenschaften wie dem hohen Schmelzpunkt von Wolfram und dem Diffusionsverhalten von Legierungselementen, was zu ungleichmäßiger Mikrostruktur oder Leistungsschwankungen führt. Die Lösungen setzen auf eine Kombination aus Prävention und Korrektur: Die Reinheitskontrolle im Pulverstadium reduziert anfängliche Defekte; die Walzgeometrie verringert die Spannungsakkumulation; und in der Prüfphase werden mehrere Methoden kombiniert, um die Genauigkeit zu verbessern. Die Lösung von Fertigungsproblemen umfasst auch Systementwicklung, die Verknüpfung der Prozesskette, die Behebung von Problemen im vorgelagerten Bereich im nachgelagerten Bereich sowie Feedback aus dem nachgelagerten Bereich zur Verbesserung des vorgelagerten Bereichs. Die hohe Dichte von Wolframlegierungsblechen verstärkt Probleme wie Risse oder Abweichungen bei der Dünnblechproduktion und erfordert daher ein sorgfältiges Management. Umweltfaktoren wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit beeinflussen die Fertigungsstabilität und müssen ständig kontrolliert werden.

### 8.2.1 Probleme bei pulvermetallurgischen Verfahren

Probleme in pulvermetallurgischen Prozessen äußern sich hauptsächlich in Fehlern bei der Pulveraufbereitung und Störungen im Sinterprozess. Diese Probleme beeinträchtigen die Qualität des Rohlings und das Mikrogefüge des fertigen Blechs und lassen sich durch Ursachenanalyse und Prozessoptimierung beheben. Fehler bei der Pulveraufbereitung resultieren aus ungleichmäßiger Reduktion oder dem Einbringen von Verunreinigungen, während Sinterstörungen mit der Temperaturregelung und der Atmosphärenführung zusammenhängen. Die Problemdiagnose erfordert eine Kombination aus chemischer Analyse und mikroskopischer Untersuchung, und Verbesserungsstrategien umfassen die Parameteroptimierung und den Einsatz von Zusatztechnologien.

Die Lösung von Prozessproblemen konzentriert sich auf grundlegende Schritte: Die Pulverreinigung reduziert Fehlerquellen, und die Homogenisierung beim Sintern verbessert die Dichte. Die Feuerfestigkeit von Wolframlegierungen verschärft Probleme bei hohen Temperaturen und erfordert daher eine präzise Steuerung. Die Einhaltung der Reinheitsstandards verhindert externe Verunreinigungen.

#### 8.2.1.1 Identifizierung und Kontrollmaßnahmen für Fehler bei der Pulverherstellung

Die Maßnahmen zur Erkennung und Kontrolle von Fehlern bei der Pulverherstellung zielen hauptsächlich auf die Reinheit, Partikelgröße und Morphologie von Wolfram- und Legierungspulvern ab. Diese Fehler, wie Agglomeration, Anreicherung von Verunreinigungen oder eine breite Partikelgrößenverteilung, können zu ungleichmäßiger Mischung und Sinterporosität führen. Die Fehlererkennung erfolgt durch Messung der Verteilung mittels Laser-Partikelgrößenanalyse, Untersuchung der Morphologie mittels Rasterelektronenmikroskopie und Analyse von Verunreinigungen mittels Spektralanalyse. Chemisch betrachtet bleiben Verunreinigungen wie Sauerstoff oder Kohlenstoff während der Reduktion zurück, während die ungleichmäßige Partikelgröße auf Temperaturschwankungen zurückzuführen ist.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Defekte wurden bei der Wasserstoffreduktion von Wolframoxid identifiziert. Unzureichende Entfernung des Wasserdampfs bei niedrigen Temperaturen führte zu Sauerstoffrückständen, die sich bei hohen Temperaturen unkontrolliert ausbreiteten und grobes Pulver bildeten. Gaseinschlüsse während der Pulverzerstäubung verursachten Poren. Nach Identifizierung und Klassifizierung zeigten sich die morphologischen Defekte unter dem Elektronenmikroskop deutlich als agglomerierte Partikel, und Verunreinigungen traten spektral deutlich hervor.

Die Kontrollmaßnahmen optimieren zunächst die Reduktionsparameter. Dabei wird die Partikelgröße durch eine stufenweise Temperaturregelung verfeinert, der Wasserstoffstrom zur Regulierung der Wasserdampfkonzentration angepasst und chemische Reduktionsmittel zur Reduzierung des Sauerstoffgehalts eingesetzt. Sieben und Klassieren im Luftstrom entfernen abnorme Partikel, während die Kugelmühle Agglomerate aktiviert und auflöst. Ein Vorbehandlungsofen zur Wasserstoffentgasung reinigt das Gas und reduziert Verunreinigungen im Ausgangsmaterial. Die Pulverlagerung umfasst Trocknung, Schutzgasversiegelung und die Verhinderung von Oxidation und Agglomeration.

In dieser Anwendung wird hochreines Wolframpulver zur Steuerung der mehrstufigen Rekristallisation von Ammoniumwolframat-Vorstufen verwendet, während das Legierungspulver mittels eines Carbonylverfahrens hergestellt wird, um eine hohe Reinheit zu erzielen. Iterative Parameter werden überwacht und Feedback-Maßnahmen angewendet, um nach der Verengung der Partikelgrößenverteilung eine gleichmäßige Durchmischung zu gewährleisten. Chemische Reinigung und Säurewäsche entfernen Oberflächenverunreinigungen, anschließend erfolgt das Trocknen und Sieben.

#### 8.2.1.2 Diagnose von Sinterprozessfehlern und Prozessverbesserung

Die Diagnose und Prozessoptimierung von Sinterprozessfehlern zielt hauptsächlich auf Probleme wie Untersinterung, Kornvergrößerung durch Übersinterung und Entmischung ab. Diese Fehler beeinträchtigen die Dichte und Homogenität des Rohlingsgefüges. Die Diagnose erfolgt durch Temperaturaufzeichnung, Dichtemessung und metallografische Untersuchung. Die Ursachen der Fehler liegen in der Abweichung vom Temperaturfenster, unzureichender Flüssigphasenumlagerung bei Untersinterung, überschüssiger Flüssigphase bei Übersinterung, die zu Partikelwachstum führt, und hoher Luftfeuchtigkeit, die Oxidationseinschlüsse verursacht.

Zu den Diagnosemethoden gehören die Analyse von Ofentemperaturprofilen auf Abweichungen, die Beobachtung der Porositätsverteilung in metallografischen Schliffen und die Prüfung auf Entmischung mittels Dichtegradienten. Die chemische Analyse flüchtiger Rückstände bestätigt Verunreinigungen und Funktionsstörungen.

Prozessverbesserungen beginnen mit der Anpassung des Temperaturfensters, der Optimierung der Liquidusphase durch segmentiertes Erhitzen und Halten sowie dem Einsatz chemischer Zusätze zur Erweiterung des Fensters. Zu den Verbesserungen der Atmosphäre gehören die Taupunktkontrolle und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



eine verbesserte Strömung, wodurch die Oxidation durch Entfernung von Wasserdampf reduziert wird. Heißisostatisches Pressen behebt Sinterfehler, und die Hochdruck-Zellkonstruktion verbessert die Verdichtung. Verbesserungen bei der Ofenbeladung umfassen die vertikale Aufhängung oder die Unterstützung durch ein Sandbett zur Reduzierung von Verformungen. In Anwendungen wird das Sintern von hochdichten Legierungen durch integriertes Heißpressen mit Feinabstimmung der Parameter nach der Diagnose verbessert. Erhöhte chemische Reinheit und Vorentgasung reduzieren Gasdefekte. Varianten wie das Vakuumsintern ersetzen Wasserstoff, um Probleme mit Wasserdampf zu lösen.

## 8.2.2 Probleme beim Walzen und Umformen

Zu den Hauptproblemen beim Walzen und Umformen zählen Warmwalzrisse und instabile Kaltverformung. Diese Probleme beeinträchtigen die Integrität und Dickengleichmäßigkeit des Blechmaterials und lassen sich durch Ursachenanalyse und Kontrollmaßnahmen beheben. Warmwalzrisse entstehen durch Spannungskonzentrationen, während Kaltverformung zu einer Verfestigungsakkumulation führt. Die Diagnose umfasst die Untersuchung von Oberfläche und Querschnitt, die Optimierung der Walzstichführung und das Glühen. Die Problemlösung konzentriert sich auf die Koordination der Verformung, die Vermeidung von Seitendruck beim Warmwalzen und den Spannungsabbau beim Kaltverformungsglühen. Die hohe Härte von Wolframlegierungen verstärkt das Problem beim Dünnblechwalzen. Die Umgebungstemperatur beeinflusst die Verformung.

### 8.2.2.1 Ursachen und Präventionsmethoden von Warmwalzrissen

Die Hauptursachen für Rissbildung beim Warmwalzen sind Spannungskonzentrationen bei hohen Temperaturen und ein ungleichmäßiges Mikrogefüge. Risse entstehen und breiten sich von Kanten oder Oberflächen aus. Chemisch gesehen ist die Spannung an schwachen Grenzflächen hoch, was die Sprödigkeit der Wolframpartikel verstärkt. Die Ursachen lassen sich auf die Porosität oder Entmischung des Walzrohlings zurückführen, und bei hohem Walzgrad übersteigt die Spannung die Zähigkeit.

Präventionsmaßnahmen optimieren zunächst das Sinterverfahren der Rohlinge, um die gewünschte Dichte zu erreichen und anfängliche Defekte zu reduzieren. Der Walzprozess beinhaltet eine schrittweise Reduktion, wobei anfänglich geringe Reduktionen der Grundformung und spätere Feinabstimmung dienen. Chemische Schmierung und Hochtemperaturbeschichtungen reduzieren die Reibungsspannung. Seitliche Führungswalzen fixieren die Blechform und verhindern Zugspannungen an den Kanten. Eine Zwischenerwärmung gewährleistet eine gleichmäßige Temperaturverteilung und stellt die Plastizität wieder her. In der Anwendung werden hochdichte Legierungen für das präventive Plattierungswalzen verwendet, um Lufteinschlüsse zu vermeiden und Spannungen abzufedern.

### 8.2.2.2 Analyse und Kontrolle der Kaltumformung

Die Analyse und Kontrolle der Kaltverformung zielt hauptsächlich auf die Vermeidung von Verfestigungsakkumulation und Verzug ab, welche die Dickengenauigkeit und Oberflächenqualität beeinträchtigen. Die Analyse erfolgt mittels Spannungskurven und metallografischer Untersuchungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Ursachen manifestieren sich in der Versetzungsvermehrung; chemisch betrachtet weist die Binderphase eine begrenzte Plastizität auf, und Wolframpartikel behindern die Verformung, was zu lokaler Dehnung führt.

Zu den Methoden der Verformungskontrolle gehören kleine und häufige Umformungen, Zwischenglühen zum Abbau von Verfestigungen und chemische Diffusion zur Wiederherstellung der Gleitfähigkeit. Gleichmäßiger Schmierstoffauftrag reduziert die Reibungsverformung. Die Spannungsregelung stabilisiert die Blechform und verhindert Wellenbildung in der Blechmitte und an den Rändern. Anpassungen am Walzprozess werden nach erfolgter Analyse vorgenommen; bei hoher Verfestigung wird die Glühzeit verlängert. Bei der Anwendungskontrolle wird die Verformung dünner Bleche durch Kreuzwalzen gesteuert, um eine gleichmäßige Spannungsverteilung zu gewährleisten. Hohe chemische Reinheit reduziert Verunreinigungen und Versetzungsblockaden. Variationen umfassen Warm- und Kaltschweißen.

### 8.2.3 Fragen der Qualitätsprüfung und -kontrolle

Qualitätsprüfung und -kontrolle umfassen vor allem Herausforderungen bei der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) und Maßtoleranzabweichungen. Diese Probleme beeinträchtigen die Genauigkeit der Abnahme und Anwendung von Fertigprodukten. Lösungen werden durch alternative Methoden und technologische Verbesserungen erzielt. Zu den Herausforderungen der ZfP zählen Matrixinterferenzen und Maßabweichungen aufgrund von Prozessschwankungen. Die Qualitätskontrolle konzentriert sich auf die Online-Überwachung und die Anpassung der Messwerte. Die Problemlösung betont die kombinierte Anwendung mehrerer Methoden, den Ersatz zerstörender Probenahmen durch ZfP-Verfahren und den Einsatz von Präzisionsgeräten zur Korrektur von Maßabweichungen. Die hohe Dichte von Wolframlegierungen erschwert die Prüfung dünner Bleche. Auch die Umgebungskalibrierung beeinflusst die Genauigkeit.

#### 8.2.3.1 Herausforderungen und alternative Lösungsansätze bei der Anwendung zerstörungsfreier Prüftechnologien

Die größten Herausforderungen bei der Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP) liegen in der hohen Dichte von Wolfram, die das Eindringen von Röntgenstrahlen behindert, und der Dämpfung von Ultraschallwellen. Dadurch ist es schwierig, innere Defekte wie Poren oder Risse zu erkennen, und chemische Dichtegradienten stören das Signal. Diese Probleme treten bei dickeren Querschnitten stärker auf, während dünnere Querschnitte größere Oberflächenstörungen erfahren.

Die alternative Lösung kombiniert Röntgen-Computertomographie (CT) zur Anpassung der Energiedurchdringung und hohe chemische Reinheit zur Reduzierung des Hintergrundrauschens. Ultraschall-Phased-Array-Technologie optimiert die Strahlfokussierung und ersetzt herkömmliche Sonden. Wirbelstromdetektion dient der Erkennung von Oberflächenrissen, und Magnetpulver unterstützt die Detektion magnetischer Legierungen. Die Lösung kombiniert die interne Röntgenuntersuchung mit Ultraschallkompensation.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 8.2.3.2 Umgang mit Maßtoleranzabweichungen und Verbesserung der Genauigkeit

Die Verbesserung der Handhabung und Präzision von Maßtoleranzabweichungen zielt hauptsächlich auf Dicken-, Breiten- oder Planheitsabweichungen ab, die durch Walzschwankungen und thermische Effekte verursacht werden. Diese Abweichungen entstehen durch instabilen Walzdruck und ungleichmäßige Spannungsentlastung in jedem Walzstich sowie durch verstärkte Unterschiede in der Wärmeausdehnung, die chemisch bedingt sind.

Die Verarbeitungsmethoden umfassen Online-Messung und -Rückmeldung zur Walzenspaltkorrektur sowie automatische Kompensation durch das Präzisionswalzwerk. Warmrichten korrigiert Verzug, und chemisches Glühen baut Eigenspannungen ab. Die Präzision wird durch ein hochsteifes Walzensystem und eine Spannungsregelung zur Reduzierung elastischer Verformungen verbessert.

Bei Anwendungen, in denen Abweichungen dünner Bleche in Echtzeit mittels Lasermessung korrigiert werden, ermöglicht das Schmieden dicker Bleche das Schleifen zum Ausgleich bestehender Toleranzen. Hohe chemische Reinheit reduziert thermisch bedingte Abweichungen. Varianten umfassen CNC-Walzen.

## 8.3 Anwendung, Leistungsprobleme und Lösungen von Wolframlegierungsblechen

Wolframlegierungsbleche stehen vor allem aufgrund ihrer praktischen Leistungsfähigkeit in verschiedenen Anwendungsbereichen im Fokus. Zu diesen Bereichen zählen Hochtemperaturermüdung, Vibrations- und Stoßfestigkeit, Schirmdämpfung, Biokompatibilität, elektrische Leitfähigkeit und Magnetismus sowie Korrosion und Oxidation. Lösungen werden durch Mechanismusanalyse, Designoptimierung und Materialmodifikation erzielt. Anwendungsprobleme entstehen häufig durch die Diskrepanz zwischen Umgebungsbedingungen und Materialeigenschaften. Ermüdungsbrüche treten häufig in Hochtemperaturumgebungen auf, die Verschlechterung der Strahlenschutzwirkung muss berücksichtigt werden, und eine anormale elektrische Leitfähigkeit in elektronischen Medizingeräten kann die Funktionalität beeinträchtigen.

Die systematische Herangehensweise an die Problemlösung spiegelt sich in Interventionen auf verschiedenen Skalen wider, von mikrostrukturellen Anpassungen bis hin zu makroskopischen Schutzbeschichtungen. Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt legen Wert auf Ermüdungs- und Stoßfestigkeit, Strahlenschutz auf Effizienzsteigerung und Sicherheitsverbesserungen, während in der Elektronik und Medizin Leitfähigkeitsstabilität und Korrosionsbeständigkeit Priorität haben. Die Zweiphasenstruktur von Wolframlegierungsblechen trägt zu dieser Lösung bei: Wolframpartikel sorgen für Stabilität, während die Bindemittelphase die Zähigkeit beeinflusst.

### 8.3.1 Anwendungsfragen von Wolframlegierungsblechen in der Luft- und Raumfahrt

Wolframlegierungsbleche in der Luft- und Raumfahrt sind unter Hochtemperaturbedingungen Ermüdungs- und Vibrations-/Stoßbelastungen ausgesetzt. Diese Probleme beeinträchtigen die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Langzeitstabilität und die strukturelle Integrität der Werkstoffe und werden durch Härtingsbehandlungen und stoßfeste Konstruktionen minimiert. Bauteile der Luft- und Raumfahrt sind wiederholten thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt, und Wolframlegierungsbleche, die als Gegengewichte oder Wärmemanagementmaterialien eingesetzt werden, müssen diesen Anforderungen gerecht werden. Die Problemanalyse konzentriert sich auf die Identifizierung der Mechanismen und die Optimierung der Konstruktion; Hochtemperaturermüdung entsteht durch die Akkumulation mikroskopischer Schäden, während Vibrations-/Stoßbelastung mit der Ausbreitung von Spannungswellen zusammenhängt.

Die Lösung von Anwendungsproblemen erfordert auch die Materialauswahl und Prozessoptimierung. Wolframlegierungen bieten ein ausgewogenes Verhältnis von Dichte und Elastizitätsmodul für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, doch die rauen Umgebungsbedingungen erfordern maßgeschneiderte Lösungen. Wolfram-Nickel-Eisen-Systeme sind in Luft- und Raumfahrtkomponenten weit verbreitet, wobei die Bindemittelphase die Verformung koordiniert. Umweltsimulationstests liefern die Grundlage für die Lösungsfindung, und beschleunigte Ermüdungstests dienen der Bestimmung der Lebensdauer.

#### 8.3.1.1 Mechanismus und Verstärkungsmaßnahmen bei Hochtemperaturermüdungsversagen

Der Mechanismus des Hochtemperatur-Ermüdungsversagens beruht hauptsächlich auf der Entwicklung mikroskopischer Schäden unter wiederholter thermomechanischer Belastung. In Wolframlegierungsblechen äußert sich dieser Mechanismus in Korngrenzgleiten, Versetzungsklettern sowie der Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen. Chemisch gesehen reduziert die Elementsegregation an der Grenzfläche die Bindungsfestigkeit, und die Spannungskonzentration um die Wolframpartikel führt zu Schäden. Der Prozess verläuft in Phasen: Zunächst vermehren sich Versetzungen und bilden persistente Bänder; in der mittleren Phase verschmelzen Mikroporen; und in der späteren Phase breiten sich Risse rasch bis zum Bruch aus. Thermische Zyklen verstärken den Mechanismus, da ungleichmäßige Ausdehnung thermische Spannungen erzeugt und die Bildung einer Oxidschicht die Oberfläche zusätzlich schwächt.

Die Festigkeitssteigerung erfolgt zunächst durch Legierungsdesign, Dotierung mit Seltenerdeelementen oder Carbiden zur Dispergierung und Fixierung von Korngrenzen sowie durch chemische Kontrolle der segregierenden Elemente, um die Gleitgeschwindigkeit zu reduzieren und die Dauerfestigkeit zu erhöhen. Wärmebehandlung, Lösungsglühen und Auslagern führen zur Ausscheidung feiner Phasen und erhöhen die Zähigkeit der Binderphase. Gleichzeitig wird der Behandlungstemperaturbereich so gesteuert, dass eine Kornvergrößerung vermieden wird. Oberflächenhärtungsmethoden wie die Ionenimplantation von Stickstoff oder Kohlenstoff bilden eine Gradientenschicht. Chemische Diffusion erhöht die Oberflächenhärte und dämpft die Rissausbreitung.

In der Prozesstechnik stellt mehrstufiges Glühen das Mikrogefüge wieder her, und die Kontrolle der chemischen Reinheit reduziert durch Verunreinigungen verursachte Schäden. Die Mechanismusüberprüfung umfasst Ermüdungsversuche, um Lastwechsel zu simulieren und das

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Bruchverhalten zu beobachten, um entsprechende Anpassungen vorzunehmen. Variationen wie das Oberflächenwalzen führen zu Druckspannungen, um der Zugermüdung entgegenzuwirken.

#### 8.3.1.2 Probleme mit Schwingungs- und Stoßbelastungen und stoßfeste Konstruktion

Das Hauptproblem bei Vibrations- und Stoßbelastungen liegt in der durch die Ausbreitung von Spannungswellen verursachten lokalen Schädigung. Bei Wolframlegierungsblechen äußert sich dies in der Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen, Spannungskonzentrationen an chemisch schwachen Grenzflächen und einer Verstärkung der Stoßwirkung aufgrund der Sprödigkeit der Wolframpartikel. Ursache hierfür ist die Überlagerung von Schwingungsfrequenzresonanz und hoher momentaner Stoßbelastung, verbunden mit einer unzureichenden Materialdämpfung zur Energieabsorption, was zu beschleunigter Materialermüdung führt.

Das stoßfeste Design optimiert zunächst die Verbundstruktur durch Laminierung von Wolframlegierungsblechen mit Polymeren und den Einsatz chemischer Bindemittel zur Dämpfung von Stoßwellen. Die Texturkontrolle ist in das Design integriert, wobei ausgerichtete Fasern die Festigkeit in eine bestimmte Richtung erhöhen. Oberflächenbeschichtungen, wie z. B. elastische Polymere, absorbieren Energie, während die chemische Kompatibilität eine stabile Haftung gewährleistet.

In Konstruktionsanwendungen dienen simulierte Schwingungsversuche der Problemanalyse und der Anpassung der Dickenverteilung zur Spannungsverteilung. Mechanismus-Analysen und Finite-Elemente-Modellierungen prognostizieren Schadensstellen und ermöglichen so die Optimierung von Verdickungen oder Verstärkungen. Varianten wie die Gradientendichte sorgen für eine schrittweise Absorption. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Problematik von Schwingungs- und Stoßbelastungen sowie stoßfester Konstruktion Strategien des dynamischen Antwort-Engineerings verkörpern. Durch Optimierung der Dämpfung wird die Schwingungsfestigkeit von Wolframlegierungsblechen verbessert und die Stabilität in der Luft- und Raumfahrt erhöht. Konstruktionsverbesserungen minimieren Stoßschäden und steigern so die Zuverlässigkeit der Werkstoffe in Schwingungsumgebungen.

#### 8.3.2 Probleme im Zusammenhang mit der Anwendung von Wolframlegierungsblechen zur Strahlenabschirmung

Wolframlegierungsbleche in Strahlenschutzanwendungen weisen Effizienzverluste und Bedenken hinsichtlich der Biokompatibilität auf. Diese Probleme beeinträchtigen die Abschirmwirkung und die sichere Anwendung und können durch Effizienzsteigerung und Sicherheitsverbesserungen behoben werden. In Strahlenschutzanwendungen müssen Wolframlegierungsbleche, die als Kollimatoren oder Schutzschichten eingesetzt werden, einer langfristigen Strahlenexposition standhalten. Der Effizienzverlust resultiert aus Strukturveränderungen, während Bedenken hinsichtlich der Biokompatibilität mit Oberflächenreaktionen zusammenhängen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Lösung von Anwendungsproblemen legt Wert auf Materialstabilität und optimierten Schutz. Die hohe Dichte von Wolfram bietet Vorteile hinsichtlich der Dicke bei der Abschirmung, jedoch sind für unterschiedliche Strahlungsumgebungen spezifische Lösungen erforderlich. Wolfram-Nickel-Kupfer-Systeme sind in der Abschirmung weit verbreitet, und ihre nichtmagnetischen Eigenschaften gewährleisten die medizinische Verträglichkeit. Umweltsimulationstests dienen als Grundlage für die Lösungsfindung, und Strahlendosisprüfungen bewerten die Veränderungen.

#### 8.3.2.1 Gründe für die Dämpfung und Wiederherstellung der Schirmdämpfung

Der Hauptgrund für die abnehmende Abschirmwirkung liegt in strahlungsinduzierten Strukturveränderungen wie Quellung, Porositätsbildung und Phasenübergängen. In Wolframlegierungsblechen äußern sich diese in einer Verringerung der Dichte und Schwankungen des Absorptionskoeffizienten. Chemisch gesehen erzeugen strahlungsbedingt verschobene Atome Leerstellencluster, und Grenzflächenschäden verstärken die Streuung. Die Ursachen und Prozesse sind dosisabhängig: Niedrige Dosen führen zu mikroskopischen Defekten, mittlere bis hohe Dosen hingegen zu makroskopischen Verformungen.

Die Wiederherstellung der Effizienz erfolgt zunächst durch Wärmebehandlung zur Behebung von Defekten, chemische Diffusion zur Beseitigung von Leerstellen und kontrollierte Glühtemperatur zur Verhinderung der Ausscheidung von Sekundärphasen. Eine schützende Oberflächenbeschichtung blockiert einfallende Strahlung, und eine chemisch inerte Schicht absorbiert Energie. Während des Wiederherstellungsprozesses werden Stabilisatoren hinzugefügt, um Defekte zu fixieren und das Aufquellen zu reduzieren.

#### 8.3.2.2 Bewertung von Biokompatibilitätsrisiken und Verbesserung der Sicherheit

Die Bewertung und Verbesserung der Sicherheit hinsichtlich Biokompatibilitätsrisiken zielt primär auf die Freisetzung von Substanzen an der Oberfläche und Gewebereaktionen ab. Bei Wolframlegierungsblechen äußern sich diese Risiken in einer begrenzten Auflösung von Bindemitteln; chemisch gesehen können Nickel- oder Kupferionen Allergien auslösen. Die Bewertung erfolgt mittels Auslaugungstests und Zellverträglichkeitstests. Zu den Ursachen dieser Risiken zählen Oberflächenoxidation oder Abrieb, wodurch die aktive Phase freigelegt wird. Die Sicherheitsverbesserungen beginnen mit der Oberflächenpassivierung zur Bildung eines stabilen Oxidfilms, gefolgt von chemischer Anodisierung oder Galvanisierung zur Blockierung der Ionenmigration. Zu den Bewertungskriterien gehören biologische Tests der Zelladhäsion und Proliferationsrate sowie Formulierungsverbesserungen zur Reduzierung des Anteils an Wirkstoffen.

#### 8.3.3 Anwendungsfragen von Wolframlegierungsblechen in elektronischen und medizinischen Geräten

Wolframlegierungsbleche in elektronischen und medizinischen Geräten weisen häufig anomale elektrische Leitfähigkeit und Magnetismus sowie Korrosion und Oxidation auf. Diese Probleme

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

beeinträchtigen die Stabilität der Leitfähigkeit und die Lebensdauer der Geräte und lassen sich durch Fehlersuche, Modifikation und Schutzbeschichtungen beheben. In elektronischen medizinischen Anwendungen müssen Wolframlegierungsbleche, die als Kühlkörper oder Abschirmung eingesetzt werden, Leitfähigkeitsschwankungen und Oxidation entgegenwirken. Anomalien entstehen durch Verunreinigungen oder Oberflächenveränderungen, während Korrosion auf Medienerosion zurückzuführen ist.

Die Lösung von Anwendungsproblemen legt den Fokus auf Fehlersuchmechanismen und die Optimierung von Beschichtungen. Wolfram-Kupfer-Systeme sind in der Elektronik weit verbreitet und weisen eine gute thermische und elektrische Leitfähigkeit auf. Umweltprüfungen liefern die Grundlage für Lösungsansätze, und Korrosionsprüfungen beschleunigen die Bewertung von Veränderungen. Zusammenfassend demonstriert diese Anwendungsproblemlösung die Materialstabilität elektrochemischer Prozesse, unterstützt die zuverlässige Funktion von Wolframlegierungsblechen in Geräten durch Modifizierungsverfahren und fördert den technologischen Fortschritt im Bereich elektronischer Medizingeräte.

#### **8.3.3.1 Untersuchung von Anomalien der elektrischen Leitfähigkeit und des Magnetfelds sowie Materialmodifikation**

Die Ursachen für elektrische Leitfähigkeits- und magnetische Anomalien liegen hauptsächlich in Verunreinigungen und Schwankungen der Phasenzusammensetzung. In Wolframlegierungsblechen äußern sich diese Faktoren in Unterbrechungen leitfähiger Kanäle oder zufälliger Magnetisierung. Chemisch gesehen bilden Sauerstoffverunreinigungen eine Isolierschicht, und die Entmischung von Eisen führt zur Bildung magnetischer Domänen. Die Untersuchung der Anomalien erfolgt mittels Widerstandsmessungen und Hysteresekurven, um Verunreinigungen oder Entmischungsbereiche zu lokalisieren.

Die Materialmodifizierung beginnt mit der Reinigung der Rohstoffe durch chemische Reduktion, um Sauerstoff und Eisen zu reduzieren. Anschließend wird die modifizierte Legierung durch Anpassung des Kupferanteils zur Verbesserung der Leitfähigkeit und durch Molybdädotierung zur Abschwächung des Magnetismus modifiziert. Oberflächenreinigung stellt die Leitfähigkeit wieder her, und chemisches Polieren entfernt Oxidationsspuren.

#### **8.3.3.2 Schutz- und Beschichtungstechnologie für Korrosions- und Oxidationsprobleme**

Schutz- und Beschichtungstechnologien gegen Korrosion und Oxidation zielen hauptsächlich auf Medienerosion und Luftoxidation ab. Diese Probleme äußern sich in Form von Lochfraß und Leistungsver schlechterung bei Wolframlegierungsblechen, wobei die Binderphase bevorzugt reagiert und eine poröse Schicht bildet. Ursachen hierfür sind feuchte Umgebungen oder die Einwirkung von Sauerstoff bei hohen Temperaturen.

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



Die Schutzbeschichtungstechnologie beginnt mit einer stromlosen Nickel-Phosphor-Abscheidung zur Bildung eines dichten Films, gefolgt von einer chemischen Autokatalyse zur Erzielung einer gleichmäßigen Bedeckung. Anschließend erfolgt die Vakuumplattierung mit Chrom-Stickstoff oder DLC zur Erhöhung der Härte und Inertheit. Die schützende Vorbehandlung passiviert die Oberfläche, und der Oxidfilm stabilisiert das Substrat.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsbleche

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

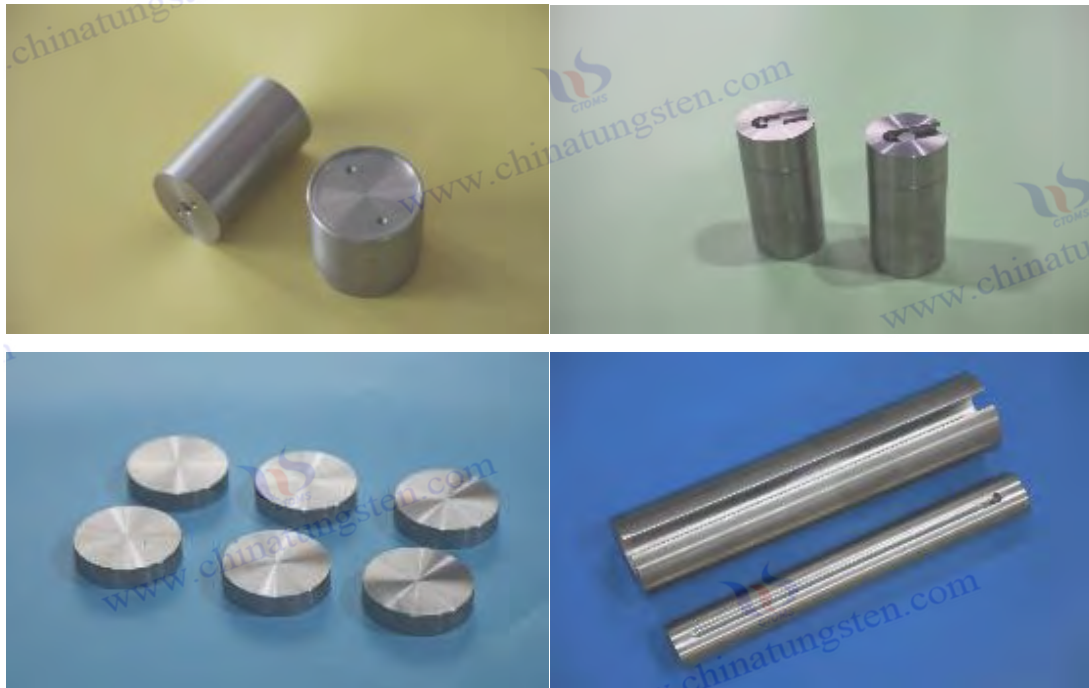
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

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



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Anhang

### Anhang A: Chinesischer Standard für Wolframlegierungsbleche

chinesischen Normen für Wolframlegierungsbleche fallen primär in die Zuständigkeit des Nationalen Technischen Komitees für die Normung von Nichteisenmetallen (TC243) und seiner Unterkomitees. Sie umfassen Aspekte wie die chemische Zusammensetzung, die physikalischen Eigenschaften, die Verarbeitungstechnologie und die Qualitätskontrolle von Wolframlegierungen. Diese Normen basieren auf nationalen Industriepolitiken und der Rohstoffplanung und gewährleisten die Zuverlässigkeit und Konsistenz von Wolframlegierungsblechen in industriellen Anwendungen. Sie betonen die Verwendung von hochreinem Wolframpulver, die Standardisierung von Flüssigphasen-Sinterprozessen und strenge Grenzwerte für Verunreinigungen wie Sauerstoff, Kohlenstoff und Phosphor, um Strukturdefekte und Leistungsabweichungen zu vermeiden. Das Normensystem umfasst nationale Normen (GB/T-Reihe), Industrienormen (YS/T-Reihe) und Unternehmensstandards, die für gängige Systeme wie Wolfram-Nickel-Eisen, Wolfram-Nickel-Kupfer und Wolfram-Kupfer gelten.

Normen legen typischerweise Zusammensetzungsbereiche, Dichteverteilungen, Härteindizes und Maßtoleranzen fest. Nach dem Sintern muss der Rohling einer thermomechanischen Bearbeitung unterzogen werden, um die Homogenität zu überprüfen. Chemische Analysemethoden sind standardisiert, beispielsweise die gravimetrische Cinquerin-Methode zur Bestimmung des Wolframgehalts, wodurch Genauigkeit gewährleistet wird. Normen berücksichtigen auch Umwelt- und Sicherheitsanforderungen und betonen die Legalität und Nachhaltigkeit der Rohstoffbeschaffung sowie die Verhinderung der Verwendung illegaler Mineralprodukte. In den letzten Jahren wurden mit der Verschärfung der Marktzugangsbestimmungen in der Wolframindustrie auch Exportkontrollelemente in die Normen aufgenommen. Diese bieten Leitlinien zur Einhaltung der Vorschriften für die Verarbeitung und den Handel mit spezifischen Wolframlegierungsprodukten. Die Anwendung von Normen für Wolframlegierungsbleche fördert die Standardisierung im gesamten Prozess von der Pulvermetallurgie bis zum fertigen Blech und unterstützt so die Erweiterung der Anwendungsbereiche in der High-End-Fertigung.

### Nationale Normen (GB/T-Reihe)

Die nationalen Normen (GB/T-Reihe) bilden die Kernspezifikationen für Wolframlegierungsbleche in China. Sie werden von der Staatlichen Marktregulierungsbehörde und der Chinesischen Normungsbehörde herausgegeben und umfassen die allgemeinen Anforderungen, Prüfverfahren und Leistungsindikatoren für Wolframlegierungen. Diese Normen gelten für die chemische Zusammensetzungsanalyse, die Bearbeitung und die Qualitätsabnahme von Wolframlegierungsblechen und gewährleisten ein ausgewogenes Verhältnis von Dichte, Härte und thermischer Stabilität. Die nationalen Normen für Wolframlegierungsbleche legen besonderen Wert auf die Standardisierung pulvermetallurgischer Prozesse, von der Reinheit des Wolframpulvers bis zur Kontrolle des Sintertemperaturbereichs. Chemisch gesehen spezifizieren sie das Wolframgehaltsverhältnis, das

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bindemittelphasenverhältnis und die Grenzwerte für Verunreinigungen, um eine gleichmäßige Verteilung des zweiphasigen Mikrogefüges zu erreichen.

Der Normungsprozess umfasste die Zusammenarbeit mehrerer Parteien, darunter Forschungsinstitute für Nichteisenmetalle und produzierende Unternehmen. Dabei wurden internationale Normen herangezogen, jedoch unter Berücksichtigung der Ressourcenmerkmale Chinas. Die GB/T-Norm für Wolframlegierungsbleche enthält allgemeine Spezifikationen für Wolframstangen, -platten und -legierungsplatten und legt Oberflächenbeschaffenheit, Dickentoleranzen und Glühbedingungen fest. Chemische Prüfverfahren, wie die Bestimmung des Wolframtrioxidgehalts, nutzen die gravimetrische Ammoniumwolframat-Methode, um Genauigkeit zu gewährleisten. Die Norm regelt auch die Wärmebehandlung und optimiert die Rekristallisationstemperatur im Glühprozess, um zu verhindern, dass Kornvergrößerung die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigt. Exportorientierte Normen enthalten regulatorische Klauseln, die Berichtspflichten für Wolfram-Nickel-Eisen- oder Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen festlegen, um die Einhaltung internationaler Handelsbestimmungen zu unterstützen.

Auf Anwendungsebene regelt die GB/T-Norm den Einsatz von Wolframlegierungsblechen in Präzisionsinstrumenten und im Wärmemanagement und deckt dabei ein breites Größenspektrum von mikrometerdünnen Folien bis hin zu zentimetergroßen Platten ab. Der Normüberarbeitungszyklus berücksichtigt technologische Fortschritte, wie beispielsweise die Verwendung nanoverstärkter Legierungen. Bei der Implementierung müssen sich Unternehmen einer Überprüfung durch zertifizierte Labore unterziehen, wobei Stichproben zur Bestimmung der Zusammensetzung und Dichte entnommen werden. Die Norm integriert ökologische Nachhaltigkeit und fördert das Recycling von Wolframpulver, um den Ressourcenverbrauch zu reduzieren.

### **Industriestandards (YS/T-Serie)**

Die vom Ministerium für Industrie und Informationstechnologie überwachten Industrienormen (YS/T-Reihe) dienen der chemischen Analyse und Verarbeitung von Wolframlegierungsblechen und liefern detaillierte technische Spezifikationen. Sie sind anwendbar auf die Herstellung von Wolfram-Kupfer-Legierungen und wolframbasierten hochdichten Legierungsblechen und gewährleisten die genaue Bestimmung der chemischen Zusammensetzung sowie gleichbleibende Eigenschaften. Die YS/T-Normen konzentrieren sich auf Methoden zur Bestimmung des Wolframgehalts, wie beispielsweise die gravimetrische Cinquercetin-Methode. Diese ermöglicht eine hochpräzise Analyse durch Lösungs- und Fällungstrennung und eignet sich zur Überprüfung des Wolframanteils in Wolfram-Kupfer-Legierungen. Die Normen legen außerdem die Probenvorbereitung, die Gerätekalibrierung und die Fehlerkontrolle fest und betonen die chemische Bedeutung der Subtraktion von Matrixinterferenzen.

Der Industriestandard für Wolframlegierungsbleche enthält detaillierte Angaben zum pulvermetallurgischen Prozess, von der Pulvermischung über Temperaturprofile für das Flüssigphasensintern bis hin zur Optimierung der Flüssigphasenmenge zur Förderung der Partikelumlagerung. Die Normen der YS/T-Reihe umfassen Blechspezifikationen für Wolfram-Nickel-

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

Eisen- und Wolfram-Nickel-Kupfer-Systeme, legen Härteverteilung und Anforderungen an die Oberflächenrauheit fest und unterstützen die Anpassungsfähigkeit der Verarbeitung für Formen- und Abschirmungsanwendungen. Die Normen wurden unter Berücksichtigung nationaler Planungsrichtlinien entwickelt und integrieren die Bedingungen für den Ressourcenzugang, um die Legalität der Rohstoffe und die Einhaltung von Umweltauflagen zu gewährleisten.

In der Anwendung dient die YS/T-Norm der Standardisierung von Prüfverfahren für Qualitätskontrolle, Maßtoleranzen und Wärmeleitfähigkeit von Wolframlegierungsblechen in der Elektronik- und Medizintechnik. Der Überarbeitungsprozess berücksichtigte Anwenderfeedback und enthielt Klauseln für neue Legierungen wie Wolfram-Molybdän-Verbundwerkstoffe. Die Umsetzung erfordert von Unternehmen die Einrichtung eigener Labore und die regelmäßige Kalibrierung der Prüfgeräte. Im Hinblick auf das Umweltmanagement fördert die Norm energiearme Sintertechnologien zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

### **Unternehmensstandards und lokale Standards**

Unternehmens- und lokale Normen ergänzen die Vorschriften für die Herstellung von Wolframlegierungsblechen in China. Sie werden von Nichteisenmetallunternehmen oder lokalen Branchenverbänden entwickelt und bieten flexible Richtlinien für spezifische Legierungssysteme oder Anwendungsszenarien. Diese Normen basieren auf dem nationalen Rahmenwerk, berücksichtigen aber auch die Prozess Erfahrung der Unternehmen, um die Anpassungsfähigkeit für die Massenproduktion zu gewährleisten. Unternehmensnormen, wie beispielsweise die internen Spezifikationen der Zhuzhou Cemented Carbide Group, legen die Walzstiche und Glühprozesse für Wolframlegierungsbleche fest und optimieren die chemische Verteilung der Bindemittelphase zur Verbesserung der Zähigkeit. Lokale Normen sind in Wolframabbaugebieten wie den Provinzen Hunan und Jiangxi weit verbreitet und betonen in Verbindung mit der Rohstoffressourcenplanung die Rückverfolgbarkeit der Rohstoffe und die Kontrolle von Verunreinigungen.

Diese Normen umfassen chemische Analysemethoden für Wolfram-Kupfer-Legierungen, einschließlich der Spurenelementbestimmung, und dienen der Konformitätsprüfung von Exportprodukten. Unternehmensstandards betonen Qualitätsmanagementsysteme, integrieren die ISO-9001-Zertifizierung in die Produktionsprozesse und gewährleisten durch Chargenverfolgung eine gleichbleibende Qualität. Lokale Standards fördern die regionale Zusammenarbeit, beispielsweise durch standardisierte Spezifikationen für hochdichte Wolframlegierungen, und unterstützen so die Optimierung der Lieferkette.

Auf Anwendungsebene regeln Unternehmensstandards die Anpassung von Wolframlegierungsblechen für Präzisionsinstrumente, während lokale Normen eine umweltfreundliche Produktion fördern. Die Anpassungen reagieren dynamisch auf den Markt und beinhalten Klauseln zu Legierungen mit hoher Entropie. Während der Implementierung wird die Einhaltung der Standards durch interne Audits überprüft. Die ökologische Nachhaltigkeit legt Wert auf Recycling und die Reduzierung von Pulveremissionen.

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



## Anhang B Internationale Normen für Wolframlegierungsbleche

Internationale Normen für Wolframlegierungsbleche werden hauptsächlich von Organisationen wie ASTM International und SAE International entwickelt. Diese Normen bieten einen weltweit einheitlichen regulatorischen Rahmen für die chemische Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften und die Prüfmethoden von Wolframlegierungsblechen und gewährleisten so die Interoperabilität von Werkstoffen in der Luft- und Raumfahrt, der Medizintechnik und der Elektronik. Internationale Normen legen Wert auf die Klassifizierung hochdichter Wolframlegierungen, wie beispielsweise das Klassifizierungssystem in ASTM B777, das Spezifikationen auf Basis des Wolframgehalts und der Art der Bindemittelphase definiert. Der Normenentwicklungsprozess beinhaltet die Zusammenarbeit von Experten aus verschiedenen Ländern und orientiert sich an allgemeinen Anforderungen für pulvermetallurgische Verfahren.

Der Abschnitt zur chemischen Analyse der internationalen Norm standardisiert die Bestimmung des Wolframgehalts und die Grenzwerte für Verunreinigungen und unterstützt so die Zertifizierung für den globalen Handel. Leistungsindikatoren wie Dichteverteilung, Härte und Wärmeleitfähigkeit sind für das Walzen von Blechen und die Überprüfung der Wärmebehandlung relevant. Die Norm integriert zudem Qualitätsmanagementsysteme wie ISO 9001, um eine gleichbleibende Produktionsqualität zu gewährleisten. Exportkontrollnormen wie das Wassenaar-Abkommen beeinflussen den internationalen Handel mit Wolframlegierungen und legen Wert auf die Einhaltung der Vorschriften.

Internationale Normen regeln den Einsatz von Wolframlegierungsblechen in Strahlungsabschirmungen und Kühlkörpern. Maßtoleranzen und Anforderungen an die Oberflächenrauheit gewährleisten eine präzise Bearbeitung. Regelmäßige Überarbeitungen berücksichtigen technologische Fortschritte und beinhalten Bestimmungen zu Verbundwerkstoffen. Die Implementierung erfordert die Zertifizierung durch unabhängige Labore und die Einhaltung der Chargenprüfungsnormen. Umweltverträglichkeit wird durch Recyclingpraktiken gefördert.

### ASTM International Standard

Die internationalen ASTM-Normen bilden die Grundlage für die Exportbestimmungen von Wolframlegierungsblechen aus China. Sie wurden von der American Society for Testing and Materials (ASTM) entwickelt und umfassen Standardvorgaben für Wolfram-Schwermetalllegierungsbleche. So definiert beispielsweise die ASTM B777 die Klassifizierung von Wolfram-Nickel-Eisen- und Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen und legt Dichteklassen sowie mechanische Anforderungen fest. Diese Normen gelten für die Herstellung und Prüfung der Bleche und spezifizieren chemisch Wolframgehaltsbereiche, Bindemittelphasenverhältnisse und Grenzwerte für Verunreinigungen, um ein ausgewogenes Zweiphasen-Gefüge zu gewährleisten.

ASTM B777 legt detailliert die chemische Zusammensetzung und die physikalischen Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen fest. Nach dem Sintern müssen die Bleche warmgewalzt werden, um die Gleichmäßigkeit zu überprüfen. Die Norm umfasst Prüfverfahren, wie beispielsweise das gravimetrische

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cincinnati -Verfahren zur Bestimmung des Wolframgehalts, und unterstützt die präzise Qualitätskontrolle. ASTM B760, die ursprünglich reine Wolframbleche und -folien spezifizierte, erweitert die Spezifikationen nun auch auf die Walzprozesse für Legierungsbleche.

In der Anwendung regeln ASTM-Normen den Einsatz von Wolframlegierungsblechen in der Luft- und Raumfahrt sowie in medizinischen Abschirmungen. Maßtoleranzen und Härtespezifikationen gewährleisten eine flexible Verarbeitung. Der Überarbeitungsprozess berücksichtigte globales Feedback und enthielt Bestimmungen zur Strahlungsbeständigkeit. Während der Implementierung validieren firmeneigene, zertifizierte Labore die Einhaltung der Normen, und Stichproben bestätigen die Konformität. Das Umweltmanagement legt Wert auf eine nachhaltige Produktion.

### **SAE International Standard**

internationalen SAE -Normen regeln die Anwendung von Wolframlegierungsblechen in der Luft- und Raumfahrt. Normen wie AMS 7725 legen die Leistungsanforderungen für hochfeste Wolframlegierungsbleche fest. Diese Normen betonen hohe Festigkeit und thermische Stabilität und eignen sich daher für Hochtemperaturbauteile. Die SAE-Normen spezifizieren die chemische Zusammensetzung und das Mikrogefüge von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen und begrenzen den Ferromagnetismus chemisch, um elektromagnetische Störungen zu vermeiden.

Die Norm AMS 7725 legt detailliert die Dichteverteilung und den Glühzustand von Wolframlegierungsblechen fest. Nach dem Sintern müssen die Bleche geschmiedet und gewalzt werden, um die Zähigkeit zu überprüfen. Die Norm umfasst Prüfverfahren wie die Bestimmung der Zugfestigkeit und der Bruchzähigkeit und unterstützt das mechanische Gleichgewicht.

In der Anwendung regeln SAE-Normen den Einsatz von Wolframlegierungsblechen in Flugzeugkomponenten. Vibrationstoleranz- und Ermüdungsindikatoren unterstützen die Konstruktion. Revisionszyklen berücksichtigen Fortschritte in der Luft- und Raumfahrt und integrieren Bestimmungen für Verbundstrukturen. Die Implementierung erfordert die AS9100-Zertifizierung und die Einhaltung von Chargenprüfungen. Umweltverträglichkeit fördert energiearme Prozesse.

### **ISO-Internationaler Standard**

Die internationalen ISO-Normen bieten einen weltweit einheitlichen Rahmen für Wolframlegierungsbleche. Die von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) entwickelten Normen, wie beispielsweise die Integration des Qualitätsmanagementsystems ISO 9001, wurden auf allgemeine Spezifikationen für Wolfram-Schwermetalllegierungsplatten ausgeweitet. Diese Normen gelten für die pulvermetallurgische Herstellung von Blechen und legen die chemische Reinheit sowie die Kontrolle von Verunreinigungen fest, um die Einhaltung internationaler Handelsbestimmungen zu gewährleisten.

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

ISO-Normen legen die chemische Analyse und die physikalischen Prüfungen von Wolframlegierungsplatten fest, und der Sinterprozess muss Umweltauflagen erfüllen. Die Normen beinhalten globale Zertifizierungsrichtlinien und unterstützen die Exportprüfung.

In der Anwendung regeln ISO-Normen den Einsatz von Wolframlegierungsblechen in der Elektronik und Medizintechnik und unterstützen funktionale Anforderungen wie Maßgenauigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Der Überarbeitungsprozess beinhaltet multinationale Zusammenarbeit und berücksichtigt Nachhaltigkeitsaspekte. Während der Implementierung werden Unternehmen auditiert, um die Rückverfolgbarkeit von Chargen und die Einhaltung der Normen sicherzustellen. Das Umweltmanagement legt Wert auf Ressourcenrecycling. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die internationalen ISO-Normen die globale Qualitätssicherung für Wolframlegierungsbleche gewährleisten, die Produktion durch Managementsysteme standardisieren und die Vertiefung der internationalen Zusammenarbeit fördern.

### **Anhang C: Normen für Wolframlegierungsbleche in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern**

Die Normensysteme für Bleche in Ländern wie den USA, Europa, Japan und Südkorea sind vielfältig. Die USA orientieren sich hauptsächlich an ASTM-Normen, Europa an EN-Normen, Japan an JIS-Normen und Südkorea an KS-Normen. Diese Normen regeln Zusammensetzung, Eigenschaften und Verarbeitung von Wolfram-Schwermetallblechen und berücksichtigen dabei die regionalen Industriebedürfnisse. Europäische und amerikanische Normen konzentrieren sich auf Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt sowie der Medizintechnik, japanische Normen auf Feinchemikalien und südkoreanische Normen unterstützen den Export von Elektronikprodukten. Die Normenentwicklung erfolgt unter Einbeziehung von Branchenverbänden, die internationale Normen berücksichtigen und gleichzeitig lokale Ressourcen einbeziehen.

Die in diesen Ländern geltenden chemischen Normen legen Grenzwerte für Wolframgehalt und Verunreinigungen fest. Zu den Leistungsindikatoren gehören Dichte und Wärmeleitfähigkeit. Anwendungen belegen den Einsatz von Wolframlegierungsblechen in Abschirmungen und Kühlkörpern. Die Technologie für dynamisches Ansprechverhalten wird überarbeitet, um Legierungsinnovationen zu integrieren. Die Implementierung erfordert zertifizierte Labore und die Einhaltung der Chargenprüfung. Nachhaltigkeit wird durch Recycling gefördert.

#### **Amerikanische Normen (ASTM, AMS-Reihe)**

Globale Normen für Wolframlegierungsbleche wurden von ASTM International und SAE entwickelt. Beispielsweise klassifiziert ASTM B 777 Wolfram-Schwermetalllegierungsbleche und definiert Dichteklassen und mechanische Spezifikationen. Diese Normen gelten für die Pulvermetallurgie und das Walzen von Blechen und legen chemisch das Bindemittelphasenverhältnis von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen fest, um nichtmagnetische Varianten zu gewährleisten.

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

ASTM B777 legt die chemische Zusammensetzung und die Prüfverfahren detailliert fest und fordert den Nachweis der Wärmebehandlung von Sinterblechen. AMS 7725 für Wolframlegierungsbleche in der Luft- und Raumfahrt legt den Schwerpunkt auf die Dauerfestigkeit. Anwendungsbereiche unterstützen den Einsatz von Wolframlegierungsblechen in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Medizintechnik. Der Überarbeitungsprozess wurde von Experten geprüft und Strahlenschutzbestimmungen aufgenommen. Die AS9100-Zertifizierung ist implementiert.

### Europäische Normen (EN-Reihe)

Europäische Normen (EN-Reihe) werden vom Europäischen Komitee für Normung (CEN) entwickelt. Beispielsweise legt die EN 2685 allgemeine Anforderungen an Wolframlegierungsbleche fest. Diese Normen gelten für die Zusammensetzung und die Eigenschaften von Wolframlegierungen und begrenzen chemische Verunreinigungen, um die Einhaltung von Umweltauflagen zu gewährleisten. EN-Normen spezifizieren Sinterverfahren und Maßtoleranzen und unterstützen so den europäischen Handel mit Blechwerkstoffen. In der Anwendung regeln sie den Einsatz von Wolframlegierungsblechen in der Nuklear- und Elektronikindustrie. Überarbeitungen erfolgen in multinationaler Zusammenarbeit. Die CE-Kennzeichnung ist verpflichtend.

### Japanische Standards (JIS-Serie)

Japanische Normen (JIS-Reihe) werden vom Japanischen Komitee für Industrienormen (JIS) erarbeitet. Beispielsweise legt JIS H 7804 die Zusammensetzung von Wolframlegierungsblechen fest. Diese Normen finden Anwendung in der Elektronik und legen besonderen Wert auf die genaue chemische Zusammensetzung. JIS-Normen betonen Reinheit und Verarbeitungsgenauigkeit und unterstützen so die japanische Wolframlegierungsblechindustrie. In der Anwendung regeln sie den Einsatz von Wolframlegierungsblechen in Halbleitern. Darüber hinaus werden technische Richtlinien überarbeitet und die JIS-Zertifizierung durchgesetzt.

### Koreanischer Standard (KS-Serie)

Koreanische Normen (KS-Reihe) werden von der Koreanischen Agentur für Industrienormen (KANA) erstellt. Beispielsweise legt die Norm KS D 3615 die Anforderungen an Wolframlegierungsbleche fest. Diese Normen unterstützen den Export von Elektronikprodukten und definieren die Wärmeleitfähigkeit chemisch. KS-Normen legen Prüfverfahren fest, die die Blechherstellung in Korea fördern. In ihren Anwendungsbereichen regeln sie die Nutzung neuer Energiequellen. Darüber hinaus werden Branchenkooperationen überarbeitet und das KS-Zeichen eingeführt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Anhang D Terminologietabelle für Wolframlegierungsbleche

Chinesische Terminologie	Kurze Erklärung
Wolframlegierungsblech	Dünne, plattenförmige Werkstoffe, deren Hauptbestandteil Wolfram ist und die mittels Pulvermetallurgie hergestellt und gewalzt werden.
Wolframlegierung mit hoher Dichte	Hochdichte Wolframlegierungen, typischerweise mit einem Wolframgehalt von über 90 %, werden für Gegengewichte oder Abschirmungen verwendet.
Flüssigphasensintern	Beim Sinterprozess entsteht eine flüssige Phase, die die Neuordnung und Verdichtung der Partikel fördert.
Binderphase	Wolframpartikel in der Legierung sorgen für Plastizität und Zähigkeit.
Auflösung-Wiederfällung	Der Mechanismus, durch den sich Wolframatome während des Flüssigphasensinterns in der Binderphase auflösen und wieder ausfällen, fördert die Sphäroidisierung der Partikel.
Kaltisostatisches Pressen	Verfahren zum gleichmäßigen Pressen und Formen von Pulverrohlingen unter Verwendung eines flüssigen Mediums.
Heißisostatisches Pressen	Nachbearbeitungstechnologie, die unter hoher Temperatur und hohem Druck die Porosität beseitigt und die Dichte erhöht.
Multilamellenkollimator	Eine Strahlformungsvorrichtung aus Wolframlegierungsklingen in einem Strahlentherapiegerät.
Kühlkörper	Wärmeleitende Substrate, die zur Wärmeableitung elektronischer Bauelemente verwendet werden, bestehen häufig aus einer Wolfram-Kupfer-Legierung.
Pseudo-Legierungen	Zwei nichtfeste Stoffe, wie zum Beispiel Wolfram-Kupfer-Legierungen, werden durch Schmelzinfiltration hergestellt.
Rekristallisationsglühen	Durch Hochtemperaturglühen wird eine Rekristallisation bewirkt, wodurch Verarbeitungsspannungen abgebaut und die Plastizität wiederhergestellt werden.
Arbeitshärtung	Kaltverformung erhöht die Versetzungsdichte und verbessert dadurch Härte und Festigkeit.
Textur	Die durch Walzverformung hervorgerufene bevorzugte Verteilung der Kristallorientierung beeinflusst die Anisotropie.
Passivierungsfilm	Eine sich spontan oder künstlich auf der Oberfläche bildende schützende Oxidschicht erhöht die Korrosionsbeständigkeit.
Fisher-Korngröße	Die durchschnittliche Partikelgröße des Pulvers wurde mittels Luftpermeationsmethode bestimmt.
Archimedes	Die Methode zur Bestimmung der Dichte von Materialien durch Wasserverdrängung.
Vickers-Härte	Der mit einem Diamanteindringkörper gemessene Härteindex ist auf Wolframlegierungen anwendbar.
Röntgenabschwächung	Die Fähigkeit eines Materials, Röntgenstrahlen oder Gammastrahlen zu absorbieren und zu streuen.
Wärmeausdehnungskoeffizient	Die Dimensionsausdehnungsrate eines Materials bei Temperaturänderungen ist wichtig für die Anpassung an das Substrat.

### 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)

## Referenzen

### Chinesische Referenzen

- [1] Wang Xiaoming, Li Wei. Herstellungsverfahren und Leistungsuntersuchung von Wolframlegierungswerkstoffen [J]. Nonferrous Metals Materials and Engineering, 2020, 41(5): 45-52.
- [2] Zhang Hua, Liu Jun. Optimierung des pulvermetallurgischen Prozesses für hochdichte Wolframlegierungsbleche [J]. Powder Metallurgy Technology, 2019, 37(4): 278-284.
- [3] Chen Li, Zhao Ming. Mikrostruktur- und mechanische Eigenschaftenanalyse von Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungsblechen [J]. Materials Reports, 2021, 35(12): 12015-12020.
- [4] Sun Wei, Yang Fan. Anwendung von Wolfram-Kupfer-Verbundblechen in der Elektronikgehäuseentwicklung [J]. Electronic Materials and Technology, 2022, 46(3): 89-95.
- [5] Li Na, Wang Qiang. Walzprozess und Oberflächenbehandlungstechnologie von dünnen Blechen aus Wolframlegierungen [J]. Rare Metals Materials and Engineering, 2018, 47(8): 1567-1573.
- [6] Xu Gang, Huang Wei. Fortschritte bei der Anwendung von Wolframlegierungen zur Strahlenabschirmung [J]. Nuclear Technology, 2023, 46(2): 201-208.
- [7] Liu Yang, Zhang Lei. Einfluss der Wärmebehandlung auf die Eigenschaften von Wolframlegierungsblechen [J]. Wärmebehandlungstechnologie, 2020, 49(10): 112-118.
- [8] Zhao Peng, Chen Ming. Forschungsfortschritte bei der Herstellungstechnologie von Wolframlegierungspulver [J]. Powder Metallurgy Industry, 2021, 31(6): 67-74.

### Englische Referenzen

- [1] Smith J, Johnson A. Herstellung und Eigenschaften von Wolfram-Schwermetalllegierungen[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(12): 8900-8915.
- [2] German R M. Flüssigphasensintern von Wolfram-Schwermetalllegierungen[J]. International Journal of Powder Metallurgy, 2020, 56(4): 45-58.
- [3] Lee KH, et al. Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften von W-Ni-Fe-Legierungen[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 802: 140-152.
- [4] Upadhyaya G S. Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoffe für elektrische Anwendungen[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 258: 123-135.
- [5] Bose A, et al. Walzen von Wolframlegierungsblechen: Prozess und Eigenschaften[J]. Powder Metallurgy, 2022, 65(3): 210-225.
- [6] Kim Y, et al. Strahlungsschutzleistung von Wolframlegierungen[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2023, 55(5): 1789-1796.
- [7] Das J, et al. Wärmebehandlungseffekte auf Wolfram-Schwermetalllegierungen[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(8): 3678-3690.
- [8] Luo SD, et al. Pulverpräparationstechniken für Wolframlegierungen[J]. International Materials Reviews, 2021, 66(7): 489-512.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT