

## Was sind Wolframlegierungskugeln

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## EINFÜHRUNG IN DIE CTIA GROUP

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

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

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

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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Inhaltsverzeichnis

### Kapitel 1 Überblick über Wolframlegierungskugeln

- 1.1 Definition von Wolframlegierungskugeln
- 1.2 Zusammensetzungssystem von Wolframlegierungskugeln
  - 1.2.1 Wolframlegierungskugelmatrix: Eigenschaften und Anforderungen an Wolfram
  - 1.2.2 Wolframlegierungskugelmatrix: Rolle von Nickel, Eisen und Kupfer
  - 1.2.3 Funktionen von Spurenzusätzen in Wolframlegierungskugeln
- 1.3 Leistungsparameter von Wolframlegierungskugeln mit unterschiedlichen Zusammensetzungen
- 1.4 Übliche Spezifikationen und Abmessungen von Wolframlegierungskugeln
- 1.5 Grundlegende Anwendungen von Wolframlegierungskugeln
- 1.6 Entwicklungskontext von Wolframlegierungskugeln
  - 1.6.1 Frühe Forschungs- und Entwicklungsphase (Mitte des 20. Jahrhunderts – 1980er Jahre)
  - 1.6.2 Industrialisierungsphase (1990er Jahre – Anfang des 21. Jahrhunderts)
  - 1.6.3 Hochleistungs-Upgrade-Phase (Seit dem 21. Jahrhundert)

### Kapitel 2 Grundlegende Eigenschaften von Wolframlegierungskugeln

- 2.1 Dichteigenschaften von Wolframlegierungskugeln
  - 2.1.1 Dichteparameterbereich von Wolframlegierungskugeln
  - 2.1.2 Dichtevergleich von Wolframlegierungskugeln mit Blei, Stahl und anderen Werkstoffen
- 2.2 Festigkeitseigenschaften von Wolframlegierungskugeln
- 2.3 Härteeigenschaften von Wolframlegierungskugeln
- 2.4 Verschleißfestigkeit von Wolframlegierungskugeln
- 2.5 Wärmeleitfähigkeit von Wolframlegierungskugeln
- 2.6 Elektrische Leitfähigkeit von Wolframlegierungskugeln
- 2.7 Thermische Stabilität von Wolframlegierungskugeln
- 2.8 Nichtmagnetische Vorteile und Anwendungen von Wolframlegierungskugeln
- 2.9 Abschirmleistung von Wolframlegierungskugeln gegen Neutronenstrahlung
- 2.10 Abschirmleistung von Wolframlegierungskugeln gegenüber Gammastrahlung
- 2.11 Faktoren, die die Leistung von Wolframlegierungskugeln beeinflussen
  - 2.11.1 Einfluss des Komponentenverhältnisses auf die Leistung von Wolframlegierungskugeln
  - 2.11.2 Einfluss des Herstellungsverfahrens auf die Eigenschaften von Wolframlegierungskugeln
  - 2.11.3 Einfluss der Nachbearbeitung auf die Eigenschaften von Wolframlegierungskugeln
- 2.12 Sicherheitsdatenblatt für Wolframlegierungskugeln der CTIA GROUP LTD

### Kapitel 3 Klassifizierung von Wolframlegierungskugeln

- 3.1 Klassifizierung von Wolframlegierungskugeln nach Zusammensetzung
  - 3.1.1 W-Ni-Fe-Legierungskugeln
  - 3.1.2 W-Ni-Cu-Legierungskugeln
  - 3.1.3 W-Cu-Legierungskugeln
  - 3.1.4 W-Ag-Legierungskugeln
  - 3.1.5 Wolframlegierungskugeln mit anderen Zusammensetzungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.2 Klassifizierung von Wolframlegierungskugeln nach Präzision
  - 3.2.1 Präzisionskugeln aus Wolframlegierung
  - 3.2.2 Wolframlegierungskugeln in Standardqualität
- 3.3 Klassifizierung von Wolframlegierungskugeln nach Anwendungsbereich
  - 3.3.1 Gegengewichtskugeln aus Wolframlegierung
  - 3.3.2 Wolframlegierungskugeln in Abschirmqualität
  - 3.3.3 Kugeln aus Wolframlegierung für Lager
  - 3.3.4 Gesundheitskugeln aus Wolframlegierung
  - 3.3.5 Wolframlegierungskugeln für medizinische Kollimatoren
  - 3.3.6 Wolframlegierungskugeln für Trägheitskomponenten in der Luft- und Raumfahrt
  - 3.3.7 Zivile Wolframlegierungskugeln (z. B. Angelbleie)

## **Kapitel 4 Herstellungsverfahren für Wolframlegierungskugeln**

- 4.1 Rohmaterialvorbehandlung von Wolframlegierungskugeln
  - 4.1.1 Reinigung von Wolframpulver für Wolframlegierungskugeln
  - 4.1.2 Elementare Proportionierung und Mischung von Wolframlegierungskugeln
- 4.2 Formgebungsprozess von Wolframlegierungskugeln
  - 4.2.1 Kaltpressen und isostatisches Pressen von Wolframlegierungskugeln
  - 4.2.2 Vergleich der Vor- und Nachteile von Kugelformverfahren für Wolframlegierungen
- 4.3 Sinterprozess von Wolframlegierungskugeln
  - 4.3.1 Temperatur- und Haltezeitkontrolle von Wolframlegierungskugeln
  - 4.3.2 Vorteile des Vakuumsinterns von Wolframlegierungskugeln
- 4.4 Weiterverarbeitung von Wolframlegierungskugeln
  - 4.4.1 Schleifen und Polieren von Wolframlegierungskugeln
  - 4.4.2 Oberflächenbehandlung von Wolframlegierungskugeln zum Schutz vor Korrosion
- 4.5 Wichtige Qualitätskontrollpunkte für Wolframlegierungskugeln
  - 4.5.1 Kontrolle der Rohmaterialreinheit für Wolframlegierungskugeln
  - 4.5.2 Kontrolle der Formgebungsdictgleichmäßigkeit von Wolframlegierungskugeln
  - 4.5.3 Stabilitätsprüfung der Wolframlegierungskugeln nach dem Sintern
- 4.6 Qualitätsprüfung von Wolframlegierungskugeln
  - 4.6.1 Dichtepfung von Wolframlegierungskugeln
  - 4.6.2 Prüfung der Maßgenauigkeit von Wolframlegierungskugeln
  - 4.6.3 Festigkeitsprüfung von Wolframlegierungskugeln
  - 4.6.4 Härteprüfung von Wolframlegierungskugeln
  - 4.6.5 Prüfung der Schirmdämpfungseigenschaften von Wolframlegierungskugeln
- 4.7 Standardsystem für Wolframlegierungskugeln
  - 4.7.1 Chinesischer Nationalstandard (GB/T) für Wolframlegierungskugeln
  - 4.7.2 Internationale Industrienormen für Wolframlegierungskugeln
  - 4.7.3 Normen für Wolframlegierungen in Europa, Amerika, Japan und Südkorea
  - 4.7.4 Branchenspezifische Normen für Wolframlegierungskugeln

## **Kapitel 5 Anwendungsgebiete von Wolframlegierungskugeln**

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.1 Anwendung von Wolframlegierungskugeln in allgemeinen Gegengewichten
  - 5.1.1 Gegengewichte aus Wolframlegierungskugeln für Baumaschinen
  - 5.1.2 Gegengewichte aus Wolframlegierungskugeln für Sportgeräte
  - 5.1.3 Zivile Wolframlegierungskugeln (Angelbleie, Modell-Gegengewichte)
  - 5.1.4 Kugeln aus Wolframlegierung für Ölbohrventile und Gegengewichte in Rohrleitungen
- 5.2 Anwendungen von Wolframlegierungskugeln im Industrie- und Präzisionsmaschinenbau
  - 5.2.1 Kugeln aus Wolframlegierung für Präzisionsbauteile mit Trägheitsmoment
  - 5.2.2 Kugeln aus Wolframlegierung für Hochpräzisionslager
  - 5.2.3 Verschleißfeste Kugeln für Vibrationssiebe und Trennanlagen
  - 5.2.4 Kugelstrahlen von Wolframlegierungen für Spritz- und Oberflächenbehandlung
  - 5.2.5 Wolframlegierungskugeln zur Kalibrierung von Messgeräten und Waagen
- 5.3 Anwendungen von Wolframlegierungskugeln in anspruchsvollen militärischen und Spezialbereichen
  - 5.3.1 Wolframlegierungskugeln für Kollimatoren in der medizinischen Strahlentherapie
  - 5.3.2 Wolframlegierungskugeln zur Strahlungsabschirmung und Neutronenabsorption in der Nuklearindustrie
  - 5.3.3 Wolframlegierungskugeln für die Luft- und Raumfahrt-Trägheitsnavigation und Schwungradanwendungen
  - 5.3.4 Wolframlegierungskugeln für kinetische Energiepenetratoren und Hohlladungsprojektilkerne
  - 5.3.5 Wolframlegierungskugeln für Schwungräder und Gyroskope zur Satellitenlageregelung
- 5.4 Anwendungen von Wolframlegierungskugeln in aufstrebenden und zukunftsweisenden Bereichen
  - 5.4.1 Auswuchten von Wolframlegierungskugeln für Laserwaffen und Hochenergiewaffensysteme
  - 5.4.2 Wolframlegierungskugeln zum Auswuchten und Gegengewichten von Hyperschallfahrzeugen
  - 5.4.3 Wolframlegierungskugeln für Tiefsee-Erkundungsfahrzeuge und U-Boote
  - 5.4.4 Wolframlegierungskugeln zum Ultraschallschweißen von Batterielaschen für neue Energietechnologien
  - 5.4.5 Wolframlegierungskugeln für 5G-Kommunikationsbasisstationsfilteroszillatoren
  - 5.4.6 Wolframlegierungskugeln für hochwertige Uhrenrotoren und automatische Aufzugsmechanismen

## **Kapitel 6 Häufige Qualitätsprobleme und Lösungen für Kugeln aus Wolframlegierungen**

- 6.1 Ursachen und Beseitigungsmethoden von Oberflächenrissen in Wolframlegierungskugeln
- 6.2 Justierung und Vermeidung von Maßabweichungen außerhalb der Toleranz bei Kugeln aus Wolframlegierung
- 6.3 Umgang mit Dichteinhomogenitäten und Entmischungsproblemen in Wolframlegierungskugeln
- 6.4 Verbesserung der Porosität und Lockerheitsdefekte auf der Oberfläche von Wolframlegierungskugeln
- Technologie zur Korrektur von Kugelform und Rundheit bei Wolframlegierungen (6,5)
- 6.6 Verfahren zur Einstellung einer zu niedrigen oder zu hohen Härte von Wolframlegierungskugeln
- 6.7 Untersuchung und Verbesserung von inneren Einschlussdefekten in Wolframlegierungskugeln
- 6.8 Behandlung von Absplitterungen und Ausbrüchen beim Schleif- und Polierprozess von Wolframlegierungskugeln

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



## Anhang

Terminologie für Wolframlegierungskugeln

Referenzen



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungskugeln

### 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 Überblick über Wolframlegierungskugeln

### 1.1 Definition von Wolframlegierungskugeln

Wolframlegierungskugeln sind hochdichte, kugelförmige Funktionsbauteile, die hauptsächlich aus Wolfram und Bindemittelphasen wie Nickel, Eisen und Kupfer bestehen und mittels Pulvermetallurgie hergestellt werden. Sie stellen eine bedeutende Erweiterung typischer hochdichter Wolfram-basierter Verbundwerkstoffe hinsichtlich ihrer Geometrie dar. Im Gegensatz zu herkömmlichen Stahl-, Keramik- oder Bleikugeln vereinen Wolframlegierungskugeln die extrem hohe Dichte, Härte und Festigkeit von Wolfram mit der durch die Legierung deutlich verbesserten Zähigkeit, Bearbeitbarkeit und Umweltverträglichkeit. Dies verschafft ihnen einen unersetzlichen Gesamtvorteil in Anwendungen, die große Massen, starke Abschirmung oder zuverlässigen Betrieb unter extremen Bedingungen auf kleinem Raum erfordern.

Aus materialwissenschaftlicher Sicht sind Wolframlegierungskugeln im Wesentlichen quasi-isotrope Kugeln, die aus Wolframpartikeln bestehen, welche von einer kontinuierlichen oder semikontinuierlichen Bindemittelphase umschlossen und fest verbunden werden. Ihre Mikrostruktur weist die typische Zweiphasencharakteristik „harte Wolframpartikel + zähe Bindemittelphase“ auf. Diese Struktur bewahrt die inhärenten physikalisch-chemischen Eigenschaften von Wolfram als hochschmelzendem Metall und überwindet gleichzeitig die gravierenden Nachteile von reinem Wolfram, wie hohe Sprödigkeit und die nahezu vollständige Unfähigkeit zur plastischen Formgebung, durch die Brückenwirkung der Bindemittelphase. Dies ermöglicht die stabile Herstellung einer kompletten Serie von Kugeln mit Größen von Mikrometern bis zu mehreren zehn Millimetern und einer Präzision von normal bis ultrapräzise unter industriellen Bedingungen.

Aus anwendungstechnischer Sicht haben Wolframlegierungskugeln ihre traditionelle Rolle als Gegengewichtskugeln oder Lagerkugeln längst hinter sich gelassen und sich zu wichtigen, strukturell-funktional integrierten Bauteilen entwickelt. Diese vereinen hochdichtes Gegengewicht, Strahlungsschutz, Speicherung von Trägheitsenergie, Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit sowie Präzisionsmessung. Daher gelten Wolframlegierungskugeln weithin als unverzichtbares Kernmaterial in der modernen Luft- und Raumfahrt, der nuklearmedizinischen Bildgebung, der Dual-Use-Spezialmunition, Präzisionsinstrumenten und neuartigen Energieanlagen. Ihre Bedeutung nimmt mit der Entwicklung von Geräten hin zu geringerem Gewicht, extremer Leistung und höherer Präzision stetig zu.

### 1.2 Zusammensetzungssystem der Wolframlegierungskugeln

Wolframlegierungskugeln lassen sich in drei Schichten unterteilen: eine Kernmatrix, eine Bindemittelphase und Spuren funktioneller Additive. Die Anteile und Arten dieser drei Komponenten bestimmen direkt die Dichte, die mechanischen Eigenschaften, die magnetischen Charakteristika, die Abschirmwirkung und die Umweltverträglichkeit der fertigen Kugel. Eine präzise abgestimmte Zusammensetzung ermöglicht eine genaue Leistungssteuerung und optimale funktionelle Anpassung bei gleichzeitig hohem Wolframgehalt. Dadurch lassen sich hochspezialisierte Produktreihen von

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframlegierungskugeln für vielfältige Anwendungen herstellen.

### 1.2.1 Wolframlegierungskugelnkernmatrix: Eigenschaften und Anforderungen an Wolfram

Wolfram ist der absolute Hauptbestandteil von Wolframlegierungskugeln und macht typischerweise über 90 % der Gesamtmasse aus. Seine Rolle besteht nicht nur darin, die Grundlage für hohe Dichte und Härte zu schaffen, sondern auch die Strahlungsdämpfung, Hochtemperaturstabilität, Verschleißfestigkeit und langfristige Dimensionsstabilität der Legierungskugeln auf mikroskopischer Ebene maßgeblich zu bestimmen. Wolfram besitzt eine extrem hohe Ordnungszahl und eine sehr dichte Kristallstruktur, wodurch es Gammastrahlen, Röntgenstrahlen und Neutronen auf natürliche und starke Weise absorbiert und streut – ein inhärenter Vorteil, den kein anderes gängiges Metall je erreichen kann.

Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften besitzt Wolfram selbst eine extrem hohe Härte und hervorragende Druckfestigkeit, weist jedoch bei Raumtemperatur eine ausgeprägte Sprödigkeit auf und ist nahezu unplastisch verformbar. Durch die Auswahl hochreinen Wolframpulvers und die Reinigung der Korngrenzen während des anschließenden Hochtemperatur-Sinterprozesses können Wolframpartikel eine nahezu ideale polyedrische Morphologie annehmen. Unter der Einkapselung der Bindemittelphase lässt sich eine Spannungsverteilung erzielen, wodurch die makroskopische Sprödigkeit in ein mikroskopisch kontrollierbares quasi-duktilen Verhalten umgewandelt wird.

An die Reinheit, Partikelgrößenverteilung, Morphologie und den Sauerstoffgehalt von Wolframpulver-Rohstoffen werden extrem hohe Anforderungen gestellt. Industrielle Wolframlegierungskugeln erfordern typischerweise eine Wolframpulverreinheit von über 99,95 % und eine Partikelgrößenverteilung innerhalb eines bestimmten Bereichs, um eine ausreichende Verbindung zwischen den Wolframpartikeln und das Fehlen signifikanter Porosität nach dem Sintern zu gewährleisten. Zu grobes Wolframpulver führt zu unvollständigem Sintern, während zu feines Pulver leicht zu viel Sauerstoff einbringt und die Ungleichmäßigkeit der Sinterschrumpfung erhöht. Die Kontrolle des Sauerstoffgehalts ist besonders wichtig; ein zu hoher Sauerstoffgehalt kann spröde Wolframoxid-Einschlüsse bilden, die zu Spannungskonzentrationen führen und Risse in den Kugeln verursachen können. Wolfram weist zudem in Hochtemperatur-Wasserstoffatmosphären oder Vakuumumgebungen hervorragende Selbstreinigungseigenschaften auf und entfernt effektiv adsorbierte Sauerstoff- und Kohlenstoffverunreinigungen von seiner Oberfläche. Dies ist eine entscheidende Voraussetzung für den Einsatz von Wolframlegierungskugeln in Anwendungen mit extrem hohen Reinheitsanforderungen (wie beispielsweise in medizinischen Kollimatoren). Kurz gesagt: Wolfram ist als Kernmatrix nicht nur mengenmäßig der Hauptbestandteil, sondern auch der entscheidende Faktor für die Qualität; seine Qualität bestimmt direkt, ob die Wolframlegierungskugeln ihr theoretisches Leistungspotenzial voll ausschöpfen können.

### 1.2.2 Bindemittel für Wolframlegierungskugeln: Die Rolle von Nickel, Eisen und Kupfer

Das Bindemittel ist nach Wolfram selbst die zweitwichtigste Komponente in Wolframlegierungskugelsystemen. Seine Hauptfunktion besteht darin, die Wolframpartikel mit hohem

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Volumenanteil fest zu einem zusammenhängenden Ganzen zu verbinden und gleichzeitig die für reines Wolfram notwendige Zähigkeit bei Raumtemperatur, Bearbeitbarkeit und Sinterfähigkeit zu verleihen. Nickel, Eisen und Kupfer sind die drei am weitesten verbreiteten Bindemittel, die jeweils unterschiedliche Rollen hinsichtlich Benetzbarkeit, mechanischer Eigenschaften, magnetischer Modulation und funktioneller Erweiterung spielen und somit die drei am häufigsten verwendeten Wolframlegierungskugelsysteme hervorbringen.

Nickel ist die Kernkomponente aller Bindemittel und zeichnet sich durch hervorragende Benetzungsfähigkeit für Wolframpartikel aus. Es bildet während des Flüssigphasensinterns eine gleichmäßige, dünne Schicht auf der Oberfläche der Wolframpartikel und fördert so effektiv deren Umlagerung und Verdichtung. Gleichzeitig besitzt Nickel selbst eine gute Duktilität und Korrosionsbeständigkeit, wodurch die Duktile-Spröde-Übergangstemperatur der Legierung deutlich gesenkt wird. Dies ermöglicht es den Wolframlegierungskugeln, bei Raumtemperatur eine gewisse plastische Verformung ohne Rissbildung zu erfahren. Darüber hinaus bilden Nickel und Wolfram nur selten spröde intermetallische Verbindungen, was die Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der Grenzflächenbindung gewährleistet.

Die Zugabe von Eisen führt primär zur Bildung einer festen Lösung mit Nickel, wodurch die Bindemittelphase weiter verstärkt und der Magnetismus durch Anpassung des Nickel-Eisen-Verhältnisses präzise gesteuert werden kann. Werden mikromagnetische oder schwachmagnetische Eigenschaften benötigt, kann durch eine entsprechende Erhöhung des Eisengehalts die spezifischen Anforderungen der Trägheitsnavigation oder von Sensoren erfüllt werden. In den meisten Anwendungen mit hochdichten Gegengewichten erzielt die Nickel-Eisen-Kombination auf wirtschaftlichste Weise das optimale Verhältnis zwischen hoher Festigkeit und hoher Zähigkeit. Eisen fördert zudem die Auflösung und Wiederausfällung von Wolframpartikeln während des Sinterprozesses, was zu runderen Wolframkörnern führt und Spannungskonzentrationen reduziert.

Kupfer wird hauptsächlich als Bindemittel in nichtmagnetischen Wolframlegierungskugelsystemen eingesetzt. Obwohl Kupfer und Wolfram unlöslich sind, kann Kupfer Wolframpartikel beim Flüssigphasensintern vollständig benetzen und beim Abkühlen ein unabhängiges, durchgehendes Kupfernetzwerk bilden. Da Kupfer selbst vollständig nichtmagnetisch ist und eine ausgezeichnete thermische und elektrische Leitfähigkeit aufweist, sind Wolframlegierungskugeln mit Nickel-Kupfer oder reinem Kupfer als Bindemittel die bevorzugten Materialien für die nuklearmedizinische Bildgebung, die Umgebungsgewichtung in der MRT und präzise nichtmagnetische Trägheitsmessgeräte. Die Kupferphase verbessert zudem die Beständigkeit der Legierung gegenüber atmosphärischer und elektrochemischer Korrosion deutlich, sodass die Kugeln auch in feuchten oder salzhaltigen Umgebungen über lange Zeiträume eine glatte Oberfläche und stabile Leistung beibehalten.

Die wissenschaftliche Kombination und das proportionale Design der drei Bindemittel bestimmen maßgeblich, ob die Wolframlegierungskugeln letztendlich die erforderliche Zähigkeit, Bearbeitbarkeit und funktionelle Spezifität bei gleichzeitig hoher Dichte aufweisen. In der Produktion wird die Gesamtmenge der Bindemittelphase üblicherweise gering gehalten, um den Dichtevorteil von Wolfram

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



bestmöglich zu erhalten. Gleichzeitig ermöglichen präzise Elementverhältnisse eine gezielte Leistungsregulierung – von vollständig nichtmagnetisch bis hin zu kontrollierbar mikromagnetisch und von der allgemeinen Gewichtung bis hin zur spezialisierten Abschirmung. Genau diese flexible Anwendung von Bindemitteln bildet die Grundlage dafür, dass Wolframlegierungskugeln den Übergang von Labormaterialien zu großtechnischen Anwendungen meistern.

### 1.2.3 Funktionen von Spurenzusätzen in Wolframlegierungskugeln

Obwohl Spurenadditive in Wolframlegierungskugeln nur in extrem geringen Mengen vorhanden sind, spielen sie eine unersetzliche Rolle bei der Regulierung wichtiger Aspekte wie der Korngrenzenreinigung, der Phasengrenzflächenverfestigung, der Absorption spezieller Strahlung und der Hemmung schädlicher Reaktionen. Ihre Zugabe entscheidet oft darüber, ob eine Wolframlegierungskugel von einem „qualifizierten Produkt“ zu einem „hochwertigen Spezialprodukt“ aufgewertet werden kann.

Zunächst werden bestimmte Seltenerdelemente oder Übergangsmetalle als Korngrenzenaktivatoren und Sauerstofffänger eingesetzt. Während des Sinterprozesses reagieren sie bevorzugt mit Rest-Sauerstoff und bilden stabile Verbindungen. Dadurch werden Oxideinschlüsse an der Wolfram-Bindemittel-Grenzfläche deutlich reduziert, die Grenzflächenhaftung verbessert und die Anzahl der Mikrorissbildungsstellen verringert. Dies ist besonders wichtig für die Herstellung von hochpräzisen, langlebigen Trägheitskugeln und Lagerkugeln.

Zweitens können zur Erfüllung der spezifischen Anforderungen der Nuklearindustrie und des Strahlenschutzes stark neutronenabsorbierende Elemente wie Bor, Gadolinium, Samarium und Dysprosium gezielt hinzugefügt werden. Diese Elemente liegen in der Bindemittelphase oder auf der Oberfläche von Wolframpartikeln in Form von Verbindungen oder Mischkristallen vor. Dadurch behalten die Wolframlegierungskugeln ihre hohe Gamma-Abschirmwirkung bei und weisen zusätzlich eine ausgezeichnete Absorptionsfähigkeit für thermische und schnelle Neutronen auf. So wird eine kombinierte Gamma-Neutronen-Abschirmung erreicht.

Darüber hinaus kann die Zugabe geringer Mengen hochschmelzender Elemente wie Kobalt, Molybdän und Rhenium die Rekristallisationstemperatur und die Hochtemperaturfestigkeit deutlich erhöhen. Dadurch behalten Wolframlegierungskugeln ihre langfristige Dimensionsstabilität und verhindern eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften im Einsatz, beispielsweise in Schwungrädern von Flugtriebwerken oder in Umgebungen mit hoher Strahlungsbelastung. Kobalt erhöht zudem die Festigkeit der Binderphase, während die Zugabe von Rhenium die Kriechfestigkeit bei hohen Temperaturen erheblich verbessert.

Darüber hinaus werden bestimmte Spurenelemente eingesetzt, um die Verflüchtigung und Migration der Bindemittelphase unter Langzeitbestrahlung oder hohen Temperaturen zu hemmen und so eine Dichteabnahme oder die Bildung einer porösen Oberfläche der Kugeln zu verhindern. Einige Hersteller fügen außerdem Spuren von Edelmetallen oder Seltenerdelementen hinzu, um selbstreinigende oder antibakterielle Eigenschaften der Oberfläche zu erzielen und damit die besonderen Anforderungen von

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

medizinischen Implantat-Gegengewichten oder Reinraumumgebungen zu erfüllen.

Der wissenschaftliche Einsatz von Spurenzusätzen beweist die Genialität der Materialentwicklung von Wolframlegierungskugeln: Durch die Zugabe einer sehr geringen Menge einer dritten Komponente wird ein qualitativer Leistungssprung erzielt, der es ermöglicht, mit demselben Matrixmaterialsystem eine Reihe von High-End-Produkten für verschiedene High-End-Bereiche wie allgemeine Gegengewichte, nichtmagnetische medizinische Geräte, nukleare Abschirmung und Hochtemperatur-Lastlagerung herzustellen und so die Grenzen seiner technischen Anwendung erheblich zu erweitern.

### **1.3 Leistungsparameter von Wolframlegierungskugeln mit unterschiedlichen Zusammensetzungen**

Wolframlegierungskugeln mit unterschiedlichen Zusammensetzungen weisen signifikante Unterschiede in Dichte, mechanischen Eigenschaften, magnetischen Charakteristika, Strahlungsabschirmung, thermischer Stabilität und Umweltverträglichkeit auf. Diese Unterschiede beruhen auf dem Synergieeffekt von Art und Anteil der Bindemittelphase sowie von Spurenadditiven, welche wiederum die jeweils geeignetsten technischen Anwendungen bestimmen.

Das W-Ni-Fe-System mit seinem höchsten Wolframgehalt und der nickel-eisenverstärkten Bindemittelphase erzielt ein optimales Verhältnis von Dichte, Festigkeit und Zähigkeit und ist daher die erste Wahl für Trägheitsnavigationssysteme in der Luft- und Raumfahrt, kinetische Penetrationsgeschosse und die meisten universellen Gegengewichtskugeln mit hoher Dichte. Seine mikromagnetischen Eigenschaften sind für die meisten militärischen und zivilen Anwendungen akzeptabel, und seine Kosten bleiben relativ überschaubar.

Das W-Ni-Cu-System erreicht vollständige Nichtmagnetismus durch den vollständigen Ersatz von Eisen durch Kupfer und behält dabei eine extrem hohe Dichte und gute Korrosionsbeständigkeit bei. Dadurch eignet es sich als Kernmaterial für Kollimatorkugeln in der Nuklearmedizin, Gegengewichtskugeln in MRT-Umgebungen und präzise nichtmagnetische Gyroskope. Die hervorragende Wärmeleitfähigkeit der Kupferphase ermöglicht zudem eine außergewöhnlich gute Leistung unter bestimmten Betriebsbedingungen, die eine schnelle Wärmeableitung erfordern.

Das W-Cu-System senkt den Schmelzpunkt der Bindemittelphase weiter und verbessert die Effizienz des Flüssigphasensinterns. Gleichzeitig verleiht es den Kugeln eine ausgezeichnete elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion. Es wird häufig in elektrischen Kontaktmaterialien oder speziellen sphärischen Elektroden eingesetzt, bei denen ein ausgewogenes Verhältnis von elektrischen, thermischen und Dichteigenschaften erforderlich ist.

Modifizierte W-Ni-Fe- oder W-Ni-Cu-Kugeln, die mit Neutronenabsorbem dotiert sind, behalten ihre ursprüngliche hohe Gamma-Abschirmwirkung bei und weisen zusätzlich eine starke Neutronenspeicherung auf. Sie finden breite Anwendung in Steuerstabantrieben von Kernreaktoren, Behältern für radioaktive Quellen und Abschirmungskomponenten für Neutronenstrahlen und

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

ermöglichen so einen umfassenden Schutz gegen verschiedene Strahlungsarten mit nur einem Material.

enthaltend Rhenium, Molybdän oder andere hochschmelzende Elemente haben die Festigkeit bei hohen Temperaturen, die Kriechfestigkeit und die Oxidationsbeständigkeit deutlich verbessert, sodass sie über längere Zeiträume in extremen thermischen Umgebungen wie Schwungrädern von Flugzeugtriebwerken, Gegengewichten von Hyperschallfahrzeugen oder der ersten Wand von Kernfusionsanlagen zuverlässig eingesetzt werden können.

Die Leistungsunterschiede verschiedener Zusammensetzungssysteme bieten Ingenieuren eine breite Auswahl: Von kostengünstigen Allzweck-Gegengewichten über nichtmagnetische Kugeln in medizinischer Qualität bis hin zu Kugeln für nukleare Abschirmungen und Höchsttemperaturen – Wolframlegierungskugeln bilden eine vollständige Leistungshierarchie, die alle Anforderungen vom zivilen Einsatz bis hin zu modernsten Verteidigungs- und Energieanlagen präzise erfüllt. Diese enge Übereinstimmung zwischen Zusammensetzung, Leistung und Anwendung ist ein deutliches Zeichen für die hohe Entwicklungsreife und den hohen technischen Standard von Wolframlegierungskugeln.

#### 1.4 Übliche Spezifikationen und Abmessungen von Wolframlegierungskugeln

Wolframlegierungskugeln sind in einer Vielzahl von Größen erhältlich, von Mikrokugeln im Submillimeterbereich bis hin zu großen Kugeln mit Durchmessern von mehreren zehn Millimetern. Alle diese Größen lassen sich stabil in Serie fertigen. Die Wahl des Durchmessers, der Oberflächenpräzision und der Toleranzzonengestaltung bestimmt direkt den jeweiligen Anwendungsbereich und die Montagemethode. In der Branche hat sich ein ausgereiftes und hochstandardisiertes Maßsystem etabliert, das alle Anforderungen von zivilen Gegengewichten bis hin zu hochmodernen militärischen Anwendungen erfüllt.

Miniaturisierte Wolframlegierungskugeln weisen hauptsächlich Durchmesser im Millimeterbereich bis zu wenigen Millimetern auf. Sie werden vorwiegend in Fokussierbohrungen von Kollimatoren für die Nuklearmedizin, in Präzisionslagern, in implantierbaren Gegengewichten für medizinische Anwendungen und beim Kugelstrahlen mit hoher Präzision eingesetzt. Dank fortschrittlicher isostatischer Press- und mehrstufiger Schleifverfahren erreichen diese Kugeln extrem hohe Werte hinsichtlich Kugelform, Rundheit und Oberflächenrauheit und erfüllen somit perfekt die strengen Anforderungen von Kanälen im Mikrometerbereich oder ultrapräzisen Wälzkörpern.

Kugeln mit kleinem bis mittlerem Durchmesser, von wenigen Millimetern bis etwa zwanzig Millimetern, stellen die größte und am weitesten verbreitete Größenkategorie dar. Diese Größenkategorie deckt die vielfältigen Anforderungen von Kreiselrotoren für die Trägheitsnavigation, Gegengewichten für Satellitenschwungräder, Abschirmkugeln für industrielle Computer, Angelbleien, Gegengewichten für Sportgeräte und verschleißfesten Kugeln für Vibrationssiebe ab. Hersteller bieten in der Regel Standardkugeln mit festen Durchmesserabstufungen an und fertigen gleichzeitig auch Kleinserien nach individuellen Vorgaben, um Vielseitigkeit und Personalisierung optimal zu vereinen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframlegierungskugeln mit großem Durchmesser (über 20 Millimeter) stoßen an die Grenzen der Bearbeitbarkeit. Sie werden hauptsächlich in Anwendungen eingesetzt, die Massen einzelner Kugeln von mehreren hundert Gramm oder sogar mehreren Kilogramm erfordern, beispielsweise als Gegengewichte für große Baumaschinen, schwere Kugeln für Ölvventile, Schiffsballast oder spezielle kinetische Energiekerne. Um eine hohe Kugelform und Dichtehomogenität bei gleichzeitig deutlich erhöhtem Volumen zu gewährleisten, werden diese Kugeln häufig durch Segmentschleifen oder mit speziellen Großschleifanlagen hergestellt.

Neben dem Durchmesser werden Wolframlegierungskugeln auch in verschiedenen Präzisionsklassen angeboten: Die Standardklasse eignet sich für allgemeine Gegengewichte und zivile Anwendungen; die mittlere bis hohe Präzisionsklasse erfüllt die Anforderungen industrieller Vibrationssiebe und metrologischer Kalibrierungen; und die Ultrapräzisionsklasse ist speziell für Trägheitsmessgeräte in der Luft- und Raumfahrt, Kollimatoren in der Nuklearmedizin und Hochpräzisionslager konzipiert. Unterschiedliche Präzisionsklassen weisen signifikante Unterschiede in Durchmessertoleranz, Kugelform, Oberflächenrauheit und Chargenkonsistenz auf, was sich direkt auf unterschiedliche Preisklassen und Lieferzeiten auswirkt.

Hervorzuheben ist, dass das Spezifikationssystem für Wolframlegierungskugeln hochgradig modular und serienbasiert ist. Bei gleicher Zusammensetzung und Präzision lässt sich eine vollständige Größenpalette von kleinsten bis größten Kugeln realisieren, was die Designauswahl und die Beschaffung großer Stückzahlen erheblich vereinfacht. Führende Unternehmen bieten darüber hinaus Weiterverarbeitungsdienstleistungen wie Oberflächenbeschichtung, Nuten, Bohren und Einlegen an. Dadurch kann eine einzelne Kugel zu einem komplexen Funktionsbauteil weiterentwickelt werden, wodurch standardisierte Produktion und individuelle Kundenwünsche optimal miteinander verbunden werden.

## 1.5 Wolframlegierungskugeln

Wolframlegierungskugeln haben in vielen Kernbereichen der modernen Industrie Einzug gehalten. Ihre hohe Dichte, ihre hervorragenden mechanischen Eigenschaften, ihre Ungiftigkeit und Umweltfreundlichkeit sowie ihre präzise Bearbeitbarkeit machen sie zum unverzichtbaren Werkstoff der Wahl, wenn ein geringes Volumen eine große Masse erzielen oder ein zuverlässiger Betrieb unter extremen Bedingungen gewährleistet werden muss.

In der Luft- und Raumfahrt sowie im Verteidigungsbereich zählen Kugeln aus Wolframlegierungen zu den wichtigsten Massenträgheitskomponenten. Hochgeschwindigkeits-Gyroskoprotoren, Satelliten-Schwungräder, Beschleunigungsmesser für die Trägheitsnavigation von Raketen und Aktuatoren zur Lageregelung nutzen hochpräzise Wolframlegierungskugeln als zentrale Energiespeicher und Trimmkomponenten. Ihre extrem hohe volumetrische Dichte sorgt für ausreichend Rotationsinertial und Zentrifugalkraft auf engstem Raum und gewährleistet so ein schnelles Ansprechverhalten und die langfristige Stabilität des Systems in komplexen Weltraumumgebungen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Die Medizin- und Nukleartechnik sind Paradebeispiele für High-End-Anwendungen von Wolframlegierungskugeln. Fokussierungs- und Parallelaperturkollimatoren in nuklearmedizinischen Bildgebungsgeräten nutzen in großem Umfang nichtmagnetische, hochpräzise Wolframlegierungskugeln, um Gammastrahlenwege zu begrenzen und Streuinterferenzen zu unterdrücken. Strahlentherapiegeräte nutzen deren überlegene Strahlungsdämpfungseigenschaften für die präzise Bestrahlung von Läsionen. Auch Abschirmungskomponenten in kerntechnischen Anlagen und Behälter für Strahlungsquellen basieren auf Wolframlegierungskugeln, die mehrschichtige, hocheffiziente Abschirmstrukturen bilden und so herkömmliche Bleimaterialien vollständig ersetzen und die Risiken von Toxizität und Umweltverschmutzung eliminieren.

Industrielle Gegengewichte und zivile Anwendungen bilden den größten Absatzmarkt für Wolframlegierungskugeln. Zu den Anwendungsgebieten zählen Baumaschinen, Ölbohrventile, Schiffsballast, Gegengewichte für Rennwagen und Aufzüge, Angelbleie, Golfschlägerköpfe und automatische Aufzugsrotoren in hochwertigen Uhren. Wolframlegierungskugeln sind weit verbreitet, da sie im Vergleich zu Stahl und Blei ein deutlich höheres Gewicht bei sehr geringem Volumen ermöglichen. Dies führt zu Produktminiaturisierung und Leistungssteigerung bei gleichzeitiger Einhaltung der geltenden Umweltauflagen.

Im Bereich der Präzisionsmaschinen und -instrumente werden die hohe Härte, Verschleißfestigkeit und Dimensionsstabilität von Wolframlegierungskugeln umfassend genutzt, beispielsweise als hochwertige Lagerkugeln, Kugeln für Vibrationssiebe, metrologische Normalgewichte und Schwingungsdämpfungsmassenblöcke für optische Plattformen. Dies verlängert die Lebensdauer der Geräte erheblich und verbessert die Messgenauigkeit.

Darüber hinaus erweitern zukunftsweisende Bereiche wie neue Energien, Tiefseeforschung, Hyperschalltechnologie und Kernfusionsanlagen die Anwendungsbereiche von Wolframlegierungskugeln rasant. Ob Ultraschallschweißelektrodenkugeln für neue Energiebatterien, Ballastkugeln für Tiefsee-U-Boote oder Schutzkugeln für die erste Wand zukünftiger Fusionsreaktoren – Wolframlegierungskugeln bleiben aufgrund ihrer einzigartigen Eigenschaften unverzichtbar. Es ist absehbar, dass sich mit der Weiterentwicklung von Geräten hin zu leichteren, extrem robusten und umweltfreundlicheren Konstruktionen der Anwendungsbereich von Wolframlegierungskugeln weiter ausdehnen und sie zu einem der wichtigsten Basismaterialien für die Entwicklung vieler strategischer Branchen werden.

## 1.6 Entwicklungskontext von Wolframlegierungskugeln

Wolframlegierungskugeln haben eine vollständige Evolution durchlaufen – von einer rein militärischen Anwendung hin zu einer militärisch-zivilen Integration und von einem einfachen Gegengewicht zu einem multifunktionalen Verbundwerkstoff. Diese Entwicklung spiegelt deutlich das historische Muster der gegenseitigen Förderung und des stetigen Fortschritts zwischen Materialwissenschaft, Pulvermetallurgie und den Anforderungen von Spitzentechnologie wider.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 1.6.1 Frühe Forschungs- und Entwicklungsphase (Mitte des 20. Jahrhunderts – 1980er Jahre)

Wolframlegierungskugeln entstanden direkt aus dem dringenden Bedarf während des Kalten Krieges an panzerbrechenden Geschossen mit hoher kinetischer Energie und an Trägheitsnavigationssystemen. Bereits Ende der 1950er-Jahre begannen die westlichen Militärmächte systematisch an hochdichten Legierungen mit Wolfram als Matrix und Nickel-Eisen als Bindemittel zu forschen. Anfänglich wurden diese in Stangen- und Plattenform für panzerbrechende Geschosse hergestellt. Mitte der 1960er-Jahre, als Gyroskope und Trägheitsnavigationssysteme für Raketen extrem hohe Anforderungen an kleine, aber schwere Gegengewichte stellten, unternahmen Forscher erstmals Versuche, Präzisionskugeln aus Wolframlegierungen für den Einsatz in Hochgeschwindigkeitsrotoren herzustellen und so die herkömmlichen Kugeln aus Stahl- oder Uranlegierungen zu ersetzen. Der entscheidende Durchbruch in dieser Phase bestand in der Etablierung und industriellen Überprüfung der Flüssigphasensintertheorie: Durch die präzise Steuerung der Sintertemperatur wurde die Bindemittelphase kurzzeitig aufgeschmolzen und benetzte die Wolframpartikel vollständig, wodurch eine sphärische Formgebung mit nahezu theoretischer Dichte erreicht wurde.

Die frühen Verfahren waren äußerst rudimentär und basierten hauptsächlich auf Formgebung und freiem Sintern. Dies führte zu geringer Kugelform und Maßgenauigkeit, die lediglich den Anforderungen allgemeiner Munition und Gegengewichte genügten. In dieser Zeit etablierte sich jedoch das W-Ni-Fe-System als Standardzusammensetzung, und das W-Ni-Cu-System, das keinen Magnetismus benötigt, wurde erstmals verifiziert. Parallel dazu entwickelten militärische Labore die erste Generation von Schleif- und Poliertechnologien. Dadurch konnte die Oberflächenqualität von Wolframlegierungskugeln von einem rauen auf ein brauchbares Niveau verbessert werden, was die Grundlage für die spätere Industrialisierung legte. Forschung und Entwicklung in dieser Phase waren fast ausschließlich auf Verteidigungsprojekte ausgerichtet, mit praktisch keiner Anwendung im zivilen Bereich. Die Produktion erfolgte in kleinem Maßstab und unter strenger Geheimhaltung.

### 1.6.2 Industrialisierungsphase (1990er Jahre – Anfang des 21. Jahrhunderts)

Das Ende des Kalten Krieges und die fortschreitende Globalisierung haben es ermöglicht, dass Wolframlegierungskugeln rasch von rein militärischen Werkstoffen auf zivile und dual verwendbare Märkte in großem Umfang übergehen. Die zunehmende Skalierung und Automatisierung von pulvermetallurgischen Anlagen sowie die ausgereifte Technologie des Kaltisostatischen Pressens haben die Ausbeute von Wolframlegierungskugeln pro Ofen von Kilogramm auf Tonnen gesteigert und die Kosten deutlich gesenkt. Der weitverbreitete Einsatz von Vakuum- und wasserstoffgeschützten Sinteröfen hat Oxideinschlüsse weiter reduziert und die innere Qualität der Kugeln verbessert.

Das bedeutendste Merkmal dieser Periode war die Etablierung und Standardisierung eines Präzisionsklassifizierungssystems. Fortschritte bei Spezialschleifmaschinen und Diamantschleifmitteln ermöglichten die Weiterentwicklung von Wolframlegierungskugeln von Standardqualitäten zu mittleren bis hohen Präzisionsqualitäten. Dadurch erreichten sie ein beispielloses Maß an Kugelform und Oberflächenrauheit und erfüllten erstmals die strengen Anforderungen von Trägheitsmessgeräten für die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Luft- und Raumfahrt sowie von Industrielagern. Gleichzeitig trieb die rasante Entwicklung von Geräten für die nuklearmedizinische Bildgebung die Industrialisierung nichtmagnetischer Wolframlegierungskugeln voran, wobei das W-Ni-Cu-System zum Standardmaterial für PET-CT- und SPECT- Kollimatoren wurde.

Wolframlegierungskugeln fanden breite Anwendung in Produkten wie Angelbleien, Golfschlägerköpfen, Gegengewichten für Rennwagen und Ölventilgewichten und trieben so den rasanten Ausbau der globalen Produktionskapazitäten voran. China, die USA, Deutschland und Russland bildeten die führenden Produktionsländer, in denen spezialisierte Fabriken für Wolframlegierungskugeln entstanden und die Lieferkette zunehmend geschlossen wurde. Strengere Umweltauflagen beschleunigten den Ersatz von Blei zusätzlich und führten zu einem raschen Anstieg der Verbreitung von Wolframlegierungskugeln im zivilen Bereich.

### 1.6.3 Hochleistungs-Upgrade-Phase (seit dem 21. Jahrhundert)

Mit Beginn des 21. Jahrhunderts hat die Entwicklung von Wolframlegierungskugeln ihre dritte Phase erreicht, die sich auf hohe Leistung, Funktionalität und Präzision konzentriert. Die neue Generation von High-End-Anlagen stellt höchste Anforderungen an die Materialeigenschaften und treibt so gleichzeitige Fortschritte in Zusammensetzung, Verarbeitung und Anwendung von Wolframlegierungskugeln voran.

Im Hinblick auf die Zusammensetzungsentwicklung wurden spezielle Systeme wie Wolfram- Rhenium, Wolfram-Kupfer mit hoher Wärmeleitfähigkeit, nichtmagnetische Legierungen hoher Reinheit sowie Gadolinium-/Bor-Dotierung zur Neutronenabsorption in Serie gefertigt. Spuren von Seltenerdmetallen und Nanotechnologie wurden eingeführt, um die Hochtemperaturfestigkeit und die Bestrahlungsstabilität weiter zu verbessern. Prozesstechnisch haben sich fortschrittliche Verfahren wie Ultrahochdruck-Kaltisostatpressen, mehrstufiges kontinuierliches Schleifen, magnetorheologisches Polieren und Vakuum-Wasserstoff-Kosintern etabliert und ermöglichen die Herstellung von Wolframlegierungskugeln mit höchster Präzision. Die stabile Massenproduktion von Kugeln im Mikrometer- und sogar Submikrometerbereich hat begonnen.

Die Anwendungsbereiche erleben ein explosionsartiges Wachstum: Zukunftsweisende Felder wie die Schutzkugel für die erste Wand von Kernfusionsanlagen, die Gegengewichtskugel für Hyperschallflugzeuge, die Ballastkugel für Tiefseesonden, die Ultraschallschweißkugel für neue Energiebatterien und die Oszillatorkugel für 5G-Filter entwickeln sich rasant. Gleichzeitig eröffnen die Fortschritte in der additiven Fertigung und der endkonturnahen Formgebung völlig neue Wege für Wolframlegierungskugeln mit komplexen inneren Hohlräumen oder Gradientenfunktionen .

Das markanteste Merkmal dieser Phase ist die enge Verzahnung von Militär und Zivilwirtschaft sowie die globale Innovationskooperation. Dank seiner vollständigen Wertschöpfungskette in der Wolframindustrie und seiner großtechnischen Fertigungskapazitäten hat sich China zum weltweit größten und umfassendsten Forschungs- und Produktionsstandort für Wolframlegierungskugeln entwickelt. Einige seiner High-End-Produkte übertreffen bereits die der traditionellen Industrienationen.

#### 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

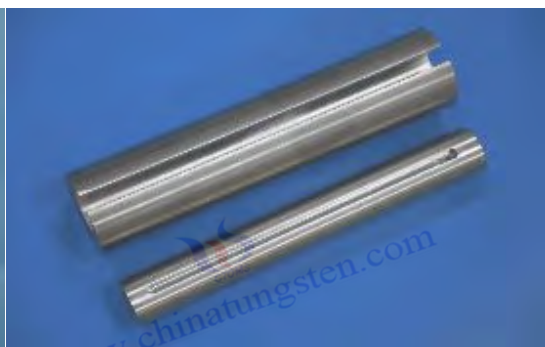
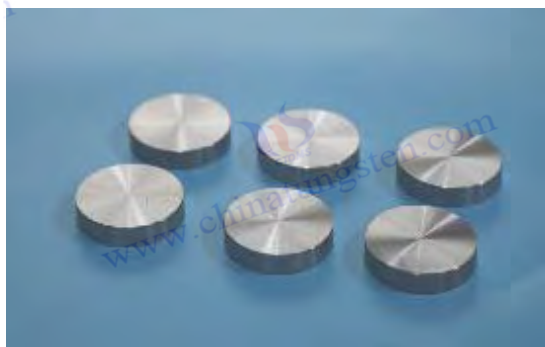
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 2 : Grundlegende Eigenschaften von Wolframlegierungskugeln

### 2.1 Dichteigenschaften von Wolframlegierungskugeln

Die Dichte ist der grundlegendste Vorteil von Wolframlegierungskugeln gegenüber allen herkömmlichen sphärischen Funktionsmaterialien und bildet die materialtechnische Basis für die Erzielung großer Masse, starker Trägheit und effizienter Abschirmung auf kleinstem Raum. Diese Eigenschaft beruht direkt darauf, dass Wolfram eines der schwersten Strukturmetalle der Natur ist und die Pulvermetallurgie einzigartige Möglichkeiten bietet, den Wolframgehalt extrem zu erhöhen.

#### 2.1.1 Dichteparameterbereich von Wolframlegierungskugeln

Die Dichte von Wolframlegierungskugeln ist nicht einheitlich, sondern variiert in einem relativ breiten, aber gut steuerbaren Bereich, um unterschiedlichen Anforderungen – von allgemeinen Gegengewichten bis hin zu extremen Spezialanwendungen – gerecht zu werden. Durch die Anpassung des Wolframgehalts, der Art und des Anteils der Bindemittelphase sowie des Sinterungsgrades lässt sich die Dichte industriell gefertigter Wolframlegierungskugeln stabil über den gesamten Bereich von niedrig bis extrem hoch einstellen.

In herkömmlichen W-Ni-Fe- und W-Ni-Cu-Systemen stellt Wolfram typischerweise den Hauptbestandteil dar, was zu einer hohen Dichte der Sinterkugeln führt, die die der meisten technischen Metalle deutlich übertrifft. Dieser Bereich gewährleistet die Leistungsanforderungen der meisten Trägheitskugeln für die Luft- und Raumfahrt, Kollimatorkugeln für die Nuklearmedizin und Hochleistungs-Gegengewichtskugeln und bietet gleichzeitig ausreichend Spielraum für die Anpassung der Zusammensetzung, um ein optimales Verhältnis zwischen Zähigkeit, Bearbeitbarkeit und Kosten zu erzielen.

Durch die Verwendung einer hochwolframhaltigen Rezeptur in Kombination mit ultrahochdruck-kaltisostatischem Pressen und mehrfachem Vakuumsintern lässt sich die Dichte von Wolframlegierungskugeln dem theoretischen Wert von reinem Wolfram annähern. Damit weisen sie die höchste Dichte aller derzeit erhältlichen präzisionsgefertigten Kugeln auf. Sie werden insbesondere für Satellitenschwungräder, Trägheitsnavigations- Beschleunigungsmesser für Raketen und spezielle Projektilkerne mit hoher kinetischer Energie eingesetzt, bei denen extrem geringe Volumenansforderungen gelten.

Umgekehrt lässt sich in bestimmten Spezialsystemen, die sowohl thermische als auch elektrische Leitfähigkeit oder Neutronenabsorption erfordern, die Gesamtdichte durch Zugabe von Kupfer oder Silber bzw. durch Dotierung mit Boriden gezielt reduzieren. Dadurch entsteht ein mittlerer bis hoher Dichtebereich für die multifunktionale Integration. Diese Kombination aus kontrollierbarer Dichte und Stabilität ermöglicht es Wolframlegierungskugeln, ihren Vorteil der hohen Dichte beizubehalten und gleichzeitig ein umfassendes Produktportfolio zu entwickeln, das nahezu alle technischen Anforderungen abdeckt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 2.1.2 Dichtevergleich von Wolframlegierungskugeln mit Blei, Stahl und anderen Werkstoffen

Im Vergleich zu herkömmlichen hochdichten Materialien weisen Wolframlegierungskugeln einen überwältigenden Dichtevorteil auf. Blei, einst das am häufigsten verwendete Schwermetall, wird zwar noch in einigen einfachen Gegengewichtsanwendungen eingesetzt, seine Dichte ist jedoch deutlich geringer als die von Wolframlegierungskugeln. Zudem ist es stark umweltschädlich und weist Mängel in den mechanischen Eigenschaften auf. Bei gleichem Volumen wiegt eine Wolframlegierungskugel mehr als 1,5-mal so viel wie eine Bleikugel. Das bedeutet, dass bei gleichen Gegengewichtsanforderungen das Volumen einer Wolframlegierungskugel nur etwa 60 % des Volumens einer Bleikugel beträgt. Dies ermöglicht revolutionäre Veränderungen in der Produktminiaturisierung und im Aufbau kompakter Strukturen. Darüber hinaus sind Wolframlegierungskugeln völlig ungiftig und recycelbar, wodurch das Verbot der Verwendung von Blei in Medizinprodukten, Produkten mit Lebensmittelkontakt und Kinderprodukten vollständig aufgehoben wird.

Im Vergleich zu verschiedenen Stahlsorten weisen Kugeln aus Wolframlegierungen einen deutlichen Dichtevorteil auf. Die Dichte von normalem Baustahl und Wälzlagerstahl beträgt nur etwa 40 % der Dichte von Wolframlegierungskugeln, und selbst die dichtesten Werkzeugstähle erreichen nicht diesen Wert. Dadurch erzielen Wolframlegierungskugeln die gleiche oder sogar eine größere Gegengewichtswirkung bei weniger als der Hälfte oder sogar einem geringeren Volumen. Dies findet Anwendung beispielsweise in Schwungrädern für Rennwagen, Golfschlägerköpfen, Angelbleien und schweren Kugeln für Ölventile und verbessert so die Produktleistung und die Benutzerfreundlichkeit erheblich.

Im Vergleich zu anderen Schwermetallkandidaten wie abgereichertem Uran bieten Wolframlegierungskugeln bei gleicher oder sogar höherer Dichte den Vorteil, radioaktive Verschmutzung und besondere regulatorische Auflagen vollständig zu vermeiden. Damit sind sie die einzig realistische Option für moderne, umweltfreundliche Hochleistungswerkstoffe. Dieser unübertroffene Dichtevorteil, kombiniert mit hervorragenden mechanischen Eigenschaften und Umweltfreundlichkeit, hat es Wolframlegierungskugeln ermöglicht, Blei, Stahl und andere traditionelle Werkstoffe in den letzten dreißig Jahren rasant zu ersetzen und sich zum absolut dominierenden hochdichten, kugelförmigen Funktionsbauteil in Anwendungen jeder Größe und im zivilen wie im militärischen Bereich zu entwickeln.

## 2.2 Festigkeitseigenschaften von Wolframlegierungskugeln

Wolframlegierungskugeln sind die zentrale Garantie für ihren zuverlässigen Langzeitbetrieb unter hohen Rotationsgeschwindigkeiten, starken Stoßbelastungen und komplexen Spannungsumgebungen. Bei gleichzeitig extrem hoher Dichte weisen sie eine umfassende mechanische Festigkeit auf, die die herkömmlicher hochdichter Werkstoffe deutlich übertrifft und sich der von hochwertigem legiertem Stahl annähert. Dadurch sind sie die erste Wahl für anspruchsvolle industrielle und zivile Anwendungen.

Die Zugfestigkeit und Streckgrenze resultieren primär aus der hohen Eigenfestigkeit der Wolframpartikel

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und dem dreidimensionalen, durch die Bindemittelphase gebildeten, durchgehenden Netzwerk. Nach dem Sintern sind die Wolframpartikel miteinander verbunden und vollständig von der duktilen Bindemittelphase umschlossen. Dadurch wird eine gleichmäßige Spannungsübertragung und -verteilung ermöglicht, wodurch die Sprödigkeit von reinem Wolfram in ein makroskopisch quasi-duktilen Verhalten umgewandelt wird. Aufgrund der verstärkenden Wirkung der Bindemittelphase weist das W-Ni-Fe-System typischerweise die höchste Festigkeit auf und eignet sich daher besonders für Anwendungen, die Hochgeschwindigkeits-Schwungräder, schwere Kugeln in Ölventilen und Gegengewichte in großen Maschinen erfordern, wo enorme Zentrifugalkräfte oder statische Lasten auftreten. Das W-Ni-Cu-System besitzt eine etwas geringere Festigkeit, übertrifft aber dennoch Nichteisenmetalle deutlich und bietet unersetzliche Vorteile in nichtmagnetischen Anwendungen.

Die Wolframlegierungskugel zeichnet sich durch hervorragende Schlagzähigkeit und Dauerfestigkeit aus und ist daher resistent gegen Rissbildung und Abplatzungen unter wiederholter Belastung, wie sie beispielsweise in Vibrationssieben, Schwungrädern von Rennwagen und den Aufprallzonen von Golfschlägern auftritt. Ihre Druckfestigkeit ist besonders beeindruckend; sie bewahrt ihre geometrische Integrität ohne plastische Verformung selbst unter extremen statischen Belastungen, wie sie etwa in Ballasttanks der Tiefsee und Gegengewichten von Schiffen vorkommen. Dieses ausgewogene Verhältnis zwischen hoher Festigkeit und moderater Zähigkeit macht die Wolframlegierungskugel von einer einfachen Kugel mit hoher Dichte zu einem zuverlässigen Bauteil, das in komplexen mechanischen Umgebungen strukturelle Funktionen erfüllen kann.

### 2.3 Härteeigenschaften von Wolframlegierungskugeln

Wolframlegierungskugeln weisen typische Eigenschaften von Verbundwerkstoffen auf: Die makroskopische Härte wird von den hochharten Wolframpartikeln dominiert, die mit Zähigkeit und Bindung einhergehen und letztendlich einen idealen Bereich bilden, der viel höher ist als bei Blei und normalem Stahl, aber niedriger als bei reinem Wolfram oder Hartmetall. Dadurch wird das beste Gleichgewicht zwischen Verschleißfestigkeit und Wirtschaftlichkeit der Verarbeitung erreicht.

Wolframpartikel selbst weisen eine extrem hohe Mikrohärtigkeit auf und tragen somit maßgeblich zur Härte bei. Nach dem Sintern nehmen die Wolframpartikel den größten Volumenanteil ein, und ihr hartes Gerüst verleiht der Kugel eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen Eindrücke und Kratzer. Obwohl die Bindemittelphase eine geringere Härte aufweist, ist sie extrem dünn und lässt sich in herkömmlichen Härteprüfungen nur schwer einzeln eindrücken; daher spiegelt die Gesamthärte hauptsächlich die Eigenschaften der Wolframphase wider. Das W-Ni-Fe-System besitzt aufgrund der vorhandenen Verstärkungselemente typischerweise die höchste Härte und eignet sich für Siebkugeln, Präzisionsgewichte und Gegengewichte, die eine hohe Verformungsbeständigkeit erfordern. Das W-Ni-Cu-System weist eine etwas geringere Härte auf, die jedoch für die Anforderungen an die Oberflächenbeständigkeit gegen Mikroschäden bei medizinischen Kollimatoren und Präzisionsinstrumenten ausreicht. Die Härte lässt sich zudem flexibel durch Prozesse und Zusammensetzung steuern: Eine verlängerte Wärmebehandlung zur Förderung des Wolframpartikelwachstums oder die Zugabe von Spuren Mengen von Elementen wie Kobalt und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Molybdän können die Härte weiter erhöhen. Umgekehrt lässt sich die Zähigkeit durch Erhöhung des Anteils der Bindemittelphase oder durch geeignetes Glühen optimieren, ohne die Härte zu beeinträchtigen. Dank dieser gezielten Härteeinstellung können Wolframlegierungskugeln präzise auf unterschiedlichste Anforderungen – von hochbelastbaren Gegengewichten bis hin zu Ultrapräzisionslagern – abgestimmt werden, ohne die Verarbeitungsschwierigkeiten oder Sprödigkeitsrisiken, die mit übermäßig harten Materialien einhergehen.

## 2.4 Verschleißfestigkeit von Wolframlegierungskugeln

Um eine lange Lebensdauer in Vibrationssieben, Präzisionslagern, Mahlkörpern und schnell rotierenden Teilen zu erreichen, beruht seine hervorragende Leistung auf dem einzigartigen tribologischen Verhalten, das durch die Synergie von hochharten Wolframpartikeln und einer zähen Bindung entsteht.

Bei Trockenreibung oder Grenzschmierung tragen die hervorstehenden, harten Wolframpartikel zunächst die Last und wirken so dem Mikroschneiden und -pflügen der Kontaktflächen wirksam entgegen. Die weichere Binderphase bildet nach mäßigem Verschleiß kleine Vertiefungen, wodurch die tatsächliche Kontaktfläche verringert und die Ölspeicherung sowie die Reibungsminderung unterstützt werden. Im weiteren Betriebsverlauf bildet sich durch feinen Verschleißabrieb ein Transferfilm an der Reibfläche, der den Reibungskoeffizienten und die Verschleißrate weiter reduziert.

In flüssigen Medien oder ölgeschmierten Umgebungen verhindert die ausgezeichnete Zähigkeit der Bindemittelphase Ermüdungsabplatzungen, während die hohe chemische Stabilität der Wolframpartikel für hervorragende Korrosions- und Verschleißbeständigkeit sorgt und selbst unter rauen Bedingungen wie Meerwasser, Säure- und Laugenlösungen oder mörtelhaltigen Schlämmen eine extrem niedrige Verschleißrate gewährleistet. Im Vergleich zu herkömmlichen Wälzlagerkugeln aus Stahl weisen Kugeln aus Wolframlegierung unter gleichen Bedingungen ein deutlich geringeres Verschleißvolumen und eine wesentlich längere Lebensdauer auf; im Vergleich zu Keramikugeln vermeiden sie das Risiko von Sprödbrüchen.

Die Verschleißfestigkeit bei hohen Temperaturen ist ebenso bedeutend. Selbst bei Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius nehmen Härte und Festigkeit von Wolframlegierungskugeln nur extrem langsam ab, und die Bindemittelphase versagt nicht wie bei herkömmlichen Schmierstoffen. Dadurch eignen sie sich ideal für Hochtemperaturlager, schnellaufende Schwungräder und bewegliche Teile in Warmumformungsanlagen. Diese überlegene Verschleißfestigkeit unter allen Betriebsbedingungen und über den gesamten Lebenszyklus hinweg macht Wolframlegierungskugeln zu den zuverlässigsten Hochleistungs-Kugelbauteilen mit hoher Verschleißfestigkeit in extremen Belastungsumgebungen wie hohen Lasten, hohen Drehzahlen, Korrosion und hohen Temperaturen.

## 2.5 Wärmeleitfähigkeit von Wolframlegierungskugeln

Wolframlegierungskugeln weisen je nach Zusammensetzungssystem erhebliche Unterschiede auf, wodurch sie für unterschiedliche Anforderungen geeignet sind, von gewöhnlichen Gegengewichten bis

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hin zu Anwendungen mit hoher Wärmeableitung und häufigen Temperaturwechseln.

Das W-Cu-System zeichnet sich durch die höchste Wärmeleitfähigkeit aus, die auf die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer und die Bildung eines durchgehenden oder halbdurchgehenden Kupfermetzwerks nach dem Sintern zurückzuführen ist. Diese Eigenschaft macht es ideal für Anwendungen, die eine schnelle Wärmeabfuhr großer Mengen in kurzer Zeit erfordern, wie beispielsweise Kühlkörper in Hochleistungselektronikgehäusen, widerstandsgeschweißte Elektrodenkugeln und Funktionskugeln in Hochtemperatur-Kühlkörperkomponenten. Selbst bei hohem Wolframgehalt bietet die Kupferphase ungehinderte Wärmeleitkanäle und gewährleistet so eine geringe Temperaturdifferenz zwischen Kugeloberfläche und -innerem.

Die Wärmeleitfähigkeit von W-Ni-Fe- und W-Ni-Cu-Systemen ist mäßig hoch. Obwohl sie deutlich geringer ist als die von reinem Kupfer, ist sie dennoch wesentlich besser als die von Edelstahl und Bleilegierungen. In schnell rotierenden Schwungrädern, automatischen Rotoren in Uhren oder Gegengewichten in großen Maschinen ist diese Wärmeleitfähigkeit ausreichend, um die durch Reibung oder Wirbelströme entstehende Wärme zeitnah abzuführen und so Dimensionsänderungen oder eine durch lokale Überhitzung verursachte Erweichung der Bindemittelphase zu vermeiden.

Insgesamt erreichen die Wolframlegierungskugeln durch ihre Zusammensetzung einen gezielt einstellbaren Gradienten der Wärmeleitfähigkeit: Ein System mit hohem Kupferanteil kommt zum Einsatz, wenn eine extrem hohe Wärmeableitung erforderlich ist, während ein System auf Nickelbasis verwendet wird, wenn ein ausgewogenes Verhältnis zwischen hoher Dichte und moderater Wärmeleitfähigkeit angestrebt wird. Diese Flexibilität ermöglicht ein zuverlässiges Wärmemanagement über einen weiten Temperaturbereich, von Präzisionsinstrumenten für niedrige Temperaturen bis hin zu industriellen Hochtemperaturanlagen.

## 2.6 Elektrische Leitfähigkeit von Wolframlegierungskugeln

Die elektrische Leitfähigkeit ist eine wichtige Eigenschaft von Wolframlegierungskugeln in den Bereichen elektrischer Kontakt und elektrische Verarbeitung und wird hauptsächlich durch die Art und Verteilung der Bindemittelphase bestimmt.

Die Systeme W-Cu und W-Ag weisen die beste elektrische Leitfähigkeit auf, wobei die Kupfer- bzw. Silberphase ein durchgehendes Netzwerk bildet. Dadurch erreicht die Kugel einen spezifischen Widerstand, der dem von reinem Kupfer bzw. reinem Silber nahekommt. Diese Wolframlegierungskugeln finden breite Anwendung als Kontaktkugeln in Hochspannungsschaltern, als Elektrodenkugeln beim Widerstandsschweißen und als leitfähige Bauteile in Vakuumschaltern. Sie nutzen die hohe Härte und Abtragsbeständigkeit von Wolfram, um dem Lichtbogen zu widerstehen, während die hohe Leitfähigkeit von Kupfer und Silber für einen geringen Kontaktwiderstand und eine geringe Joulesche Erwärmung sorgt.

Aufgrund des Nickelanteils ist die Leitfähigkeit von W-Ni-Fe- und W-Ni-Cu-Systemen deutlich geringer

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

als die von Kupfer-Silber-Systemen, aber immer noch wesentlich höher als die von Edelstahl, Titanlegierungen oder Keramik. In Anwendungen, die ein ausgewogenes Verhältnis von hoher Dichte, nichtmagnetischen Eigenschaften und einer gewissen Leitfähigkeit erfordern, wie beispielsweise leitfähige Gegengewichte in medizinischen Geräten oder leitfähige Wälzkörper in Präzisionsinstrumenten, können diese Kugeln die Anforderungen weiterhin erfüllen.

Hervorzuheben ist, dass alle Wolframlegierungskugeln mit Silber, Gold oder Nickel beschichtet werden können, um den Kontaktwiderstand weiter zu reduzieren oder die Oxidationsbeständigkeit und Leitfähigkeit zu verbessern. Diese Oberflächenmodifizierung ermöglicht in Kombination mit der Leitfähigkeit des Materials eine optimale Anpassung der Wolframlegierungskugeln an unterschiedlichste elektrische Kontaktanwendungen – von Niederspannungs-Präzisionsinstrumenten bis hin zu Hochspannungs-Hochstromschaltern.

## 2.7 Thermische Stabilität von Wolframlegierungskugeln

Eigenschaften von Wolframlegierungskugeln spiegeln sich in ihrer Fähigkeit wider, die mechanischen Eigenschaften, die Maßgenauigkeit und die Mikrostruktur über lange Zeiträume bei hohen Temperaturen zu erhalten. Dies ist ein entscheidender Vorteil, der sie von Blei, Polymergewichten und gewöhnlichem legiertem Stahl unterscheidet.

Wolfram selbst besitzt einen extrem hohen Schmelzpunkt, wodurch die Legierungskugeln eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen Erweichung bei hohen Temperaturen aufweisen. Selbst bei Temperaturen von mehreren hundert Grad oder sogar darüber behält das Wolframpartikelgerüst seine ursprüngliche Härte und Festigkeit, und die Bindemittelphase zeigt keine signifikante Verflüchtigung oder einen Verlust der Fließfähigkeit. Die Systeme W-Ni-Fe und W-Ni-Cu weisen nach langjährigem Einsatz bei hohen Temperaturen einen minimalen Festigkeitsverlust auf und eignen sich daher besonders für rotierende Hochtemperatur-Schwungräder, bewegliche Teile von Warmumformmaschinen und Gegengewichte in Hochtemperaturöfen.

Ein weiteres wichtiges Merkmal ist der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient. Dieser ist deutlich geringer als der von Aluminium, Kupfer und Edelstahl und ähnelt dem der meisten Keramik- und Quarzwerkstoffe. Dadurch ergeben sich minimale Dimensionsänderungen über einen weiten Temperaturbereich. Dies ist entscheidend für Präzisionsinstrumente, Uhrrotoren, Schwingungsdämpfungskugeln in optischen Plattformen und Hochtemperatur-Messgewichte, da so deren ursprüngliche geometrische Genauigkeit und Funktionsstabilität auch bei Temperaturschwankungen erhalten bleiben.

Ihre Temperaturwechselbeständigkeit ist ebenfalls hervorragend. Bei schnellen Temperaturanstiegen und -abfällen oder lokalen Temperaturschocks gleichen sich die Wärmeausdehnungen der Wolframpartikel und der Bindemittelphase optimal aus, was zu geringen Grenzflächenspannungen und einer geringen Wahrscheinlichkeit der Mikrorissbildung führt. Dadurch eignen sich Wolframlegierungskugeln für den Langzeiteinsatz in Hochtemperatur-Schweißelektroden, beweglichen Teilen von Heißpressformen und

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Hochtemperatur-Vakuumumgebungen. Genau diese exzellente thermische Stabilität über den gesamten Temperaturbereich von Raumtemperatur bis zu hohen Temperaturen macht Wolframlegierungskugeln zu einem der wenigen hochdichten Funktionswerkstoffe in modernen Industriesystemen, die ihre Leistungsfähigkeit über extreme Temperaturbereiche nahezu unverändert beibehalten.

## 2.8 Die nichtmagnetischen Vorteile und Anwendungen von Wolframlegierungskugeln

Wolframlegierungskugeln zeichnen sich durch ihre entscheidenden Eigenschaften für Anwendungen in Präzisionsinstrumenten, der medizinischen Bildgebung und in elektromagnetisch reinen Umgebungen aus. Durch präzise Kontrolle der Zusammensetzung erreichen Wolframlegierungskugeln ein breites Spektrum an magnetischen Eigenschaften – von vollständig nichtmagnetisch bis nur schwach magnetisch. Dadurch werden die Anwendungsbeschränkungen herkömmlicher hochdichter Materialien in sensiblen Bereichen mit starken Magnetfeldern oder schwachen magnetischen Störungen vollständig beseitigt.

Vollständig nichtmagnetische Wolframlegierungskugeln, beispielsweise aus dem System W-Ni-Cu, weisen eine einzigartige Eigenschaft auf: Kupfer und Wolfram bilden keine ferromagnetischen Phasen, und der Nickelgehalt wird streng unterhalb der nichtmagnetischen Schwelle gehalten. Dies führt letztendlich zu einer magnetischen Permeabilität nahe dem Vakuumniveau. Diese Eigenschaft erfüllt die Anforderung an Nichtmagnetismus für alle Gewichte und Strukturbauteile von MRT-Geräten und verhindert so Artefakte oder Positionsdrift durch Magnetisierung während der Bildgebung. Auch in Kollimatoren und Abschirmungskomponenten von High-End-Systemen der Nuklearmedizin wie PET-CT und SPECT sind nichtmagnetische Wolframlegierungskugeln zu einem unverzichtbaren Standardmaterial geworden. Sie bieten eine hochdichte Abschirmung, ohne das Magnetfeld des Detektors zu beeinflussen.

Im Bereich der Präzisionsmesstechnik finden nichtmagnetische Wolframlegierungskugeln breite Anwendung in hochpräzisen Waagen, Drehtischen für Trägheitsnavigationssysteme, Schwingungsdämpfungsmassen für optische Plattformen und Gegengewichten für seismische Detektoren. Selbst geringste magnetische Hysterese oder Magnetostraktion können zu Messfehlern führen. Die nichtmagnetischen Eigenschaften der Wolframlegierungskugeln gewährleisten hingegen höchste Wiederholgenauigkeit und Stabilität des Systems im Langzeitbetrieb. Auch in der industriellen Automatisierung werden aufgrund ihrer magnetischen Störfestigkeit bevorzugt nichtmagnetische Wolframlegierungskugeln für Hochgeschwindigkeits-Magnetlager, Auswuchtkugeln für Magnetpumpen und Gegengewichte für EMV-Prüfungen eingesetzt.

Im Vergleich zu herkömmlichen nichtmagnetischen Edelstählen oder Titanlegierungen weisen nichtmagnetische Wolframlegierungskugeln bei gleichem Volumen eine deutlich höhere Masse auf. Dadurch lassen sich in Geräten auf kleinerem Raum größere Trägheits- oder Gegengewichtseffekte erzielen. Dies vermeidet die Nachteile der unzureichenden Dichte von Edelstahl und der hohen Kosten von Titanlegierungen. Aus diesen Gründen haben sich nichtmagnetische Wolframlegierungskugeln als ausgereiftestes und zuverlässigstes hochdichtes, nichtmagnetisches Funktionsmaterial für moderne

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Medizingeräte, Präzisionsmesstechnik und elektromagnetisch reine Umgebungen etabliert.

## 2.9 Abschirmleistung von Wolframlegierungskugeln gegen Neutronenstrahlung

Die Verwendung von Wolframlegierungskugeln im Bereich der Neutronenstrahlungsabschirmung beruht auf der Möglichkeit, durch Spurenzusätze gezielt stark neutronenabsorbierende Elemente einzubringen. Dadurch behalten sie ihre hohe Dichte an Gamma-Abschirmungseigenschaften bei und erzielen zusätzlich eine effiziente Abfangleistung für thermische und schnelle Neutronen, wodurch ein umfassender Schutz gegen gemischte Strahlungsfelder erreicht wird.

Elemente mit hohem Einfangquerschnitt wie Bor, Gadolinium, Samarium und Dysprosium werden in W-Ni-Fe- oder W-Ni-Cu- Matrizen eingebracht. Diese Elemente sind gleichmäßig in der Binderphase oder auf der Oberfläche der Wolframpartikel in Form von Verbindungsmikropartikeln oder Mischkristallen verteilt. Beim Durchgang des Neutronenstrahls durch die Kugel reagieren die Dotierungselemente bevorzugt mit thermischen Neutronen und wandeln diese in niederenergetische Sekundärteilchen oder stabile Isotope um. Dadurch wird der Neutronenfluss effektiv reduziert. Wolfram selbst bremst schnelle Neutronen gut ab und reduziert deren Energie durch mehrfache elastische und inelastische Streuprozesse in den Bereich thermischer Neutronen. Anschließend erfolgt der vollständige Einfang durch die Dotierungselemente, wodurch ein vollständiger Abschirmmechanismus gegen schnelle und thermische Neutronen entsteht.

Diese kombinierte Abschirmwirkung zeigt sich eindrucksvoll in Behandlungsräumen der Nuklearmedizin, Neutroneneinfangtherapiegeräten und Abschirmstrukturen um Forschungsreaktoren. Wolframlegierungskugeln lassen sich flexibel in die Zwischenräume poröser oder gewellter Platten oder Behälter einbringen und bilden so eine Abschirmschicht mit hoher Dichte und starker Absorptionsfähigkeit. Dabei werden die Nachteile von herkömmlichem Borosilikat-Polyethylen, wie geringe Dichte und hohe Bleitoxizität, vermieden. Im Schutzdesign von Anlagen zur Produktion radioaktiver Isotope, zur Lagerung medizinischer Neutronenquellen und von industriellen Neutronenfehlererkennungsgeräten haben sich neutronendotierte Wolframlegierungskugeln als optimale Lösung erwiesen, um Platzeffizienz und Abschirmwirkung in Einklang zu bringen.

Im Vergleich zu reinen Borid- oder Cadmiumplatten weisen Wolframlegierungskugeln eine deutlich verbesserte mechanische Festigkeit, Temperaturbeständigkeit und Dimensionsstabilität auf. Dadurch behalten sie ihre Abschirmwirkung auch unter Bedingungen hoher Temperaturen, hoher Luftfeuchtigkeit oder bei Langzeitbestrahlung ohne Alterung bei. Genau diese umfassenden Vorteile – Anpassbarkeit, Kompositierbarkeit und präzise Formgebung – haben Wolframlegierungskugeln zu einem unverzichtbaren Bestandteil des Neutronenstrahlungsschutzes gemacht.

## 2.10 Abschirmleistung von Wolframlegierungskugeln gegenüber Gammastrahlung

Die Abschirmwirkung von Wolframlegierungskugeln gegen Gammastrahlen beruht hauptsächlich auf der extrem hohen Ordnungszahl und Dichte von Wolfram, wodurch es den höchsten

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Massenschwächungskoeffizienten und die geringste Halbwertschichtdicke aller präzisionsgefertigten Materialien aufweist und somit das effizienteste und kompakteste Gammastrahlenabschirmungsmaterial im modernen Strahlenschutz darstellt. Zu den wichtigsten Wechselwirkungen zwischen Gammastrahlen und Materie zählen der photoelektrische Effekt, die Compton-Streuung und die Bildung von Elektronenpaaren. Der Wirkungsquerschnitt des photoelektrischen Effekts ist direkt proportional zu höheren Potenzen der Ordnungszahl. Wolfram besitzt aufgrund seiner hohen Ordnungszahl eine extrem hohe Absorptionsfähigkeit für Gammastrahlen über einen weiten Energiebereich, insbesondere im niedrigen bis mittleren Energiebereich. In Kombination mit der extrem hohen Dichte von Wolframlegierungskugeln ist die Dicke einer Abschirmschicht gleicher Masse deutlich geringer als die von Blei, Eisen oder Beton, wodurch ein höherer Dämpfungsfaktor auf begrenztem Raum erreicht wird.

Bei der Konstruktion von Behandlungsräumen für medizinische Linearbeschleuniger, PET-CT-Scanräumen, Dunkelkammern für die industrielle Fehlerprüfung und Lagertanks für radioaktive Quellen werden Wolframlegierungskugeln häufig verwendet, um mehrschichtige Abschirmwände, Spalten in Drehtüren oder lokale Verstärkungsbereiche zu füllen. Dadurch entsteht eine dichte und gleichzeitig flexible Abschirmstruktur. Ihre Kugelform bietet zudem zusätzliche Vorteile bei der Streuunterdrückung: Die natürlich entstehenden gekrümmten Kanäle zwischen den Kugeln verlängern effektiv die Streuwege der Photonen und verbessern so die Abschirmwirkung insgesamt.

Im Vergleich zu herkömmlichen Bleiziegeln sind Wolframlegierungskugeln völlig ungiftig, korrosionsbeständig, recycelbar und weisen eine hohe mechanische Festigkeit auf, ohne die mit Blei verbundenen Probleme des Kriechens, Fließens oder der Freisetzung toxischer Stoffe. Die überlegene Gesamtleistung von Wolframlegierungskugeln zeigt sich besonders deutlich in mobilen Abschirmbehältern, Transporttanks und persönlicher Schutzausrüstung, die häufig bewegt oder angepasst werden muss. Diese perfekte Kombination aus hoher Abschirmwirkung, geringer Größe, Ungiftigkeit, Umweltfreundlichkeit und Langzeitstabilität macht Wolframlegierungskugeln zu einem der angesehensten Gammastrahlenabschirmungsmaterialien im modernen medizinischen Strahlenschutz, industriellen Strahlenschutz und der Entsorgung radioaktiver Abfälle.

## **2.11 Faktoren, die die Leistung von Wolframlegierungskugeln beeinflussen**

Die Eigenschaften von Wolframlegierungskugeln sind keine inhärente Konstante des Materials selbst, sondern das Ergebnis der synergistischen Steuerung mehrerer Variablen wie Zusammensetzungsverhältnis, Herstellungsverfahren und Nachbearbeitung. Diese hohe Designflexibilität ermöglicht es, aus demselben Basismaterial ein komplettes Produktsystem für verschiedene Anwendungsbereiche wie zivile Gegengewichte, medizinische Abschirmungen, Hochtemperaturkomponenten und Präzisionsinstrumente herzustellen.

### **2.11.1 Der Einfluss des Komponentenverhältnisses auf die Leistung von Wolframlegierungskugeln**

Das Zusammensetzungsverhältnis ist der Hauptfaktor, der die Dichte, die mechanischen Eigenschaften, den Magnetismus, die thermische und elektrische Leitfähigkeit sowie die Strahlungsabschirmung von

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

Wolframlegierungskugeln bestimmt. Durch präzise Anpassung des Wolframgehalts sowie der Art und des Anteils der Bindemittelphase lassen sich vielfältige Leistungsoptimierungen erzielen.

Der Wolframgehalt ist der direkteste Weg, die Dichte zu steuern. Eine Erhöhung des Wolframanteils kann die Gesamtdichte deutlich verbessern, wodurch Kugeln in kleineren Bauräumen eine höhere Masse erreichen. Dies macht sie geeignet für platzsparende Anwendungen wie Schwungräder, Uhrenrotoren und medizinische Kollimatoren. Eine moderate Reduzierung des Wolframgehalts ermöglicht die Zugabe einer Bindemittelphase, wodurch die Zähigkeit und Bearbeitbarkeit verbessert werden. Dies erfüllt die höheren Anforderungen an die Schlagzähigkeit in Anwendungen wie Vibrationssiebkugeln und hochbelastbaren Gegengewichten. Art und Anteil der Bindemittelphase bestimmen die magnetischen und funktionellen Eigenschaften. Systeme mit Nickel-Eisen als Bindemittelphase erzielen ein ausgewogenes Verhältnis zwischen geringem Magnetismus und hoher Festigkeit und eignen sich für die meisten Anwendungen mit hohen Drehzahlen und industriellen Gegengewichten. Systeme mit Nickel-Kupfer oder Reinkupfer als Bindemittelphase sind vollständig nichtmagnetisch und weisen eine verbesserte thermische und elektrische Leitfähigkeit auf. Sie sind daher die bevorzugte Wahl für die nuklearmedizinische Bildgebung, MRT-Umgebungen und elektrische Kontaktbauteile. Ein höherer Kupferanteil führt zu einer besseren thermischen und elektrischen Leitfähigkeit, jedoch zu einer etwas geringeren Festigkeit und Dichte, was einen typischen Kompromiss in der Leistungsfähigkeit darstellt.

Die Zugabe von funktionellen Spurenelementen erweitert die Einstellmöglichkeiten zusätzlich. Die Zugabe von Kobalt, Molybdän und Rhenium verbessert die Hochtemperaturfestigkeit und Kriechfestigkeit signifikant; die Dotierung mit Elementen wie Bor und Gadolinium verleiht den Kugeln zusätzliche Neutronenabsorptionskapazität; Seltenerd- oder Übergangsmetallelemente verbessern die mechanischen Eigenschaften und die Strahlungsstabilität durch die Reinigung der Korngrenzen und die Unterdrückung von Sauerstoffeinschlüssen. Die gezielte Zusammensetzung dieser Spurenelemente ermöglicht es, Wolframlegierungskugeln von Allzweck- zu Spezialfunktionskugeln sprunghaft zu weiterentwickelt zu machen, ohne das Grundsystem zu verändern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die präzise Auslegung des Komponentenverhältnisses Wolframlegierungskugeln eine extrem hohe Anpassungsfähigkeit ihrer Eigenschaften verleiht. Ingenieure können so die optimale Lösung hinsichtlich verschiedener Dimensionen wie Dichte, Festigkeit, Magnetismus, Wärmeleitfähigkeit und Abschirmung entsprechend den jeweiligen Einsatzbedingungen finden. Dies ist die grundlegende Materialgrundlage, die es Wolframlegierungskugeln ermöglicht, die vielfältigen Anforderungen verschiedenster Bereiche – von zivilen Anwendungen bis hin zu High-End-Medizin- und Industrieanwendungen – zu erfüllen.

### 2.11.2 Einfluss des Herstellungsverfahrens auf die Eigenschaften von Wolframlegierungskugeln

Der Herstellungsprozess bildet die entscheidende Verbindung zwischen Wolframlegierungskugeln und pulverförmigen Rohmaterialien und führt zu Hochleistungsprodukten. Jeder einzelne Schritt beeinflusst direkt den Verdichtungsgrad, die Gleichmäßigkeit des Mikrogefüges und die Erreichung der angestrebten Endleistung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Das Formgebungsverfahren ist der Hauptfaktor, der die Dichtehomogenität beeinflusst. Im Vergleich zum Formpressen bietet das Kaltisostatische Pressen (CIP) einen gleichmäßigen Druck in alle Richtungen. Dadurch werden Dichtegradienten und innere Spannungen im Vorformling deutlich reduziert, was zu Sinterkugeln führt, deren Dichte der theoretischen Dichte näher kommt und das Risiko von Rissen verringert. Hochdruckisostatisches Pressen (HIP) kann die anfängliche Packungsdichte der Wolframpartikel weiter erhöhen und so bessere Bedingungen für das anschließende Flüssigphasensintern schaffen.

Die Parameter des Sinterprozesses haben den größten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit. Die optimale Abstimmung von Flüssigphasensintertemperatur und Haltezeit bestimmt direkt, ob die Bindemittelphase die Wolframpartikel ausreichend benetzt und ob die Wolframpartikel eine adäquate Lösungs- und Wiederausfällungsreaktion durchlaufen. Dies beeinflusst die Grenzflächenhaftung und die Kugelform der Wolframpartikel. Zu hohe Temperaturen können zu einem übermäßigen Verlust der Bindemittelphase oder zu abnormalem Wachstum der Wolframpartikel führen und somit die Zähigkeit verringern. Zu niedrige Temperaturen hingegen führen zu einer unzureichenden Verdichtung und damit zur Bildung von Restporosität, die die Festigkeit beeinträchtigt. Die Wahl einer Vakuum- oder Wasserstoffschutzatmosphäre ist ebenso entscheidend, da sie schädliche Verunreinigungen wie Sauerstoff und Kohlenstoff effektiv entfernt und die Bildung spröder Einschlüsse verhindert.

Nachfolgendes Schleifen, Polieren und Wärmebehandlung optimieren die Leistungsfähigkeit. Mehrstufiges Präzisionsschleifen bestimmt nicht nur die Kugelform und Oberflächenrauheit, sondern verbessert durch das Entfernen der Oberflächenfehlerschicht auch die Dauerfestigkeit und Verschleißfestigkeit deutlich. Durch geeignetes Glühen oder Auslagern lassen sich Schleifrestspannungen abbauen, der Zustand der Bindemittelphase optimieren und die Schlagzähigkeit sowie die Dimensionsstabilität weiter verbessern. Oberflächenbeschichtungen oder chemische Passivierungsbehandlungen erhöhen die Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit und verlängern die Lebensdauer in feuchten oder chemischen Umgebungen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass jeder Schritt des Herstellungsprozesses einen deutlichen Einfluss auf die Leistung hat: Die Umformung bestimmt die Qualität des Rohlings, das Sintern die Mikrostruktur und Dichte, und die Nachbehandlung den Oberflächenzustand und die Spannungsverteilung. Nur durch die systematische Optimierung aller Prozessparameter kann das theoretische Leistungspotenzial von Wolframlegierungskugeln in praktische Zuverlässigkeit umgesetzt werden. Dies ist der Hauptgrund für die signifikanten Unterschiede in Leistung und Preis zwischen hochwertigen Wolframlegierungskugeln und Standardprodukten.

### 2.11.3 Einfluss der Weiterverarbeitung auf die Eigenschaften von Wolframlegierungskugeln

Die Weiterverarbeitung ist ein entscheidender Schritt bei der Umwandlung von Wolframlegierungskugeln aus Sinterrohlingen in hochpräzise, funktionale Fertigprodukte. Sie beeinflusst direkt die Oberflächenbeschaffenheit, Maßgenauigkeit, mechanischen Eigenschaften und die Langzeitstabilität der Kugeln. Diese Phase umfasst mehrere Prozesse wie Schleifen und Polieren,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmebehandlung, Oberflächenmodifizierung und Qualitätssortierung. Jeder Schritt erfordert eine präzise Steuerung, um die Entstehung neuer Defekte zu vermeiden und die in vorherigen Prozessen erzielten mikrostrukturellen Vorteile nicht zu zerstören.

Schleifen und Polieren haben als Kernprozesse den größten direkten Einfluss auf die Oberflächenqualität und die mechanischen Eigenschaften. Durch progressives Schleifen mit mehrstufigen Diamantschleifmitteln oder Keramikmedien kann die Oberfläche der Kugel schrittweise von einem rauen Rohling zu einer spiegelglatten Oberfläche entwickelt werden. Dies verbessert nicht nur die Kugelform und Rundheit, sondern reduziert auch Mikrorisse und Eigenspannungen deutlich. Diese Oberflächenoptimierung verbessert unmittelbar die Dauerfestigkeit und Verschleißfestigkeit und macht die Kugel weniger anfällig für Abplatzungen oder Lochfraß bei Hochgeschwindigkeitswalzen oder wiederholten Stößen. Übermäßiges Schleifen kann jedoch zu einer übermäßigen Freilegung von Wolframpartikeln an der Oberfläche führen, die Dicke der zähen Schicht verringern und Spröbruch verursachen. Daher ist eine strenge Kontrolle des Abtrags und des Polierdrucks unerlässlich.

Die Wärmebehandlung dient hauptsächlich dazu, durch Sintern und Schleifen entstandene Eigenspannungen abzubauen und den Zustand der Binderphase weiter zu optimieren. Geeignetes Vakuumglühen oder Tieftemperatur-Altern fördert die Diffusion und Bindung von Wolframpartikeln an der Grenzfläche zur Binderphase und verbessert so die Schlagzähigkeit und Hochtemperaturstabilität. Gleichzeitig wird eine durch Hochtemperatur-Rekristallisation bedingte Kornvergrößerung vermieden. Eine unsachgemäße Wärmebehandlung kann geringfügige Dimensionsänderungen oder eine Vergrößerung der inneren Porosität verursachen und die Langzeit-Dimensionsstabilität der Präzisions-Gegengewichtskugel beeinträchtigen.

Oberflächenmodifizierungsverfahren wie Vernickelung, Vergoldung, chemische Passivierung oder PVD-Beschichtung verbessern die Funktionalität und erfüllen spezifische Umgebungsanforderungen. Die Beschichtung verbessert nicht nur die Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit, sondern reduziert auch den Reibungskoeffizienten und die Sekundärelektronenemission und gewährleistet so eine gleichbleibende Leistung der Kugeln in feuchter, saurer Umgebung. In alkalischen oder Vakuumumgebungen ist die Kontrolle der Beschichtungsdicke und -haftung entscheidend; eine zu große Dicke kann zum Ablösen führen, während eine zu geringe Dicke keinen wirksamen Schutz bietet.

Die Qualitätssortierung und Endkontrolle nutzen zerstörungsfreie Verfahren wie Magnetschwebepprüfung, Laserscanning oder optische Bildgebung, um eine gleichbleibende Qualität von Charge zu Charge zu gewährleisten. Diese Sortierung entfernt nicht nur fehlerhafte Kugeln, sondern kategorisiert sie auch anhand ihrer mikroskopischen Eigenschaften. So lässt sich direkt feststellen, ob die Kugeln für Anwendungen wie High-End-Lager, medizinische Kollimatoren oder Präzisionsinstrumente geeignet sind. Die Gesamtwirkung der nachfolgenden Bearbeitung lässt sich mit „Oberflächenoptimierung, Spannungsabbau, Funktionsverbesserung und Qualitätssicherung“ zusammenfassen. Ihre wissenschaftliche Umsetzung stellt den entscheidenden Schritt dar, um Wolframlegierungskugeln von qualifizierten Produkten zu hochfunktionalen Bauteilen zu entwickeln.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

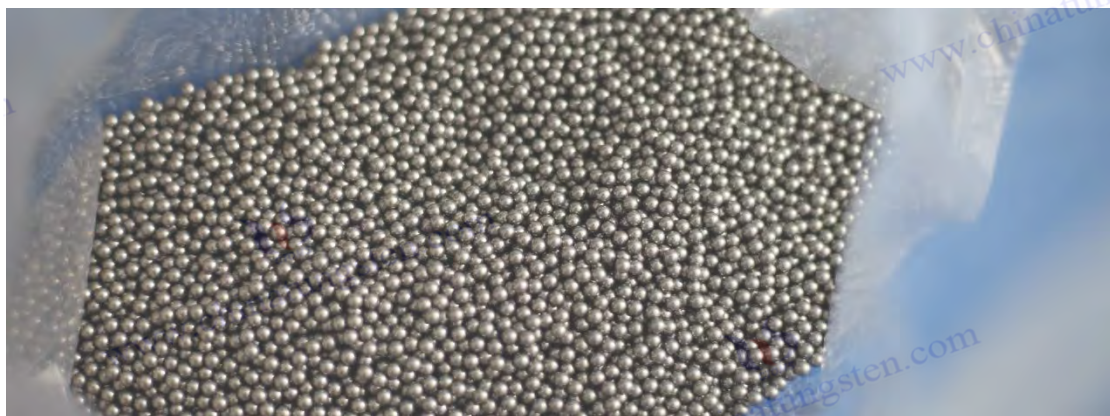
## 2.12 CTIA GROUP LTD Wolframlegierungskugel Sicherheitsdatenblatt

Das Sicherheitsdatenblatt (SDB) für Wolframlegierungskugeln der Zhongwu Intelligent Manufacturing Co., Ltd. ist ein Standarddokument zur Chemikaliensicherheit, das speziell für die hochdichten Wolframlegierungskugeln des Unternehmens entwickelt wurde. Es dient der umfassenden Risikobewertung und bietet Schutzhinweise für den gesamten Lebenszyklus – von der Produktion über Transport und Verwendung bis hin zur Entsorgung. Als Hightech-Unternehmen, das sich auf Wolframwerkstoffe spezialisiert hat, hält sich das SDB von Zhongwu Intelligent Manufacturing strikt an internationale Standards (wie die GHS-Richtlinien) und nationale Vorschriften (wie GB/T 16483). Es umfasst Kernbereiche wie Stoffidentifizierung, Gefahrenklassifizierung, Erste-Hilfe-Maßnahmen, Brandbekämpfung, Umgang mit Verschüttungen, Expositionskontrolle, physikalisch-chemische Eigenschaften, Stabilität und Reaktivität, toxikologische Informationen, ökologische Auswirkungen, Abfallentsorgung, Transportinformationen und regulatorische Hinweise. So wird die Sicherheit und Konformität der Anwender in industriellen, zivilen und medizinischen Anwendungen gewährleistet.

Im Abschnitt zur Materialidentifizierung wird zunächst die chemische Zusammensetzung der Wolframlegierungskugeln erläutert: Die CAS-Nummer lautet primär Wolfram (7440-33-7), ergänzt durch Nickel (7440-02-0), Eisen (7439-89-6) oder Kupfer (7440-50-8) usw. Es handelt sich um hochdichte Metallkugeln, typischerweise mit silbergrauem oder metallischem Glanz. Das Dokument betont, dass die Kugeln feste pulvermetallurgische Produkte und nicht staubförmig sind und keine flüchtigen Gase freisetzen.

Im Abschnitt über physikalisch-chemische Eigenschaften werden Wolframlegierungskugeln als hochschmelzende, hochtemperaturbeständige Metallverbundwerkstoffe mit extrem niedriger Löslichkeit beschrieben, die in Wasser unlöslich, aber in Königswasser oder heißer konzentrierter Schwefelsäure löslich sind.

Die Transportinformationen stufen Wolframlegierungskugeln als nicht gefährliche Güter ein und erlauben ihren Transport als gewöhnliche Metallprodukte. Die regulatorischen Informationen enthalten Konformitätserklärungen zu REACH und RoHS sowie zur Einhaltung der chinesischen Normenreihe GB 30000.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungskugeln

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Kapitel 3 Klassifizierung von Wolframlegierungskugeln

### 3.1 Klassifizierung von Wolframlegierungskugeln nach Zusammensetzung

Die Klassifizierung von Wolframlegierungskugeln nach ihrer Zusammensetzung ist die grundlegendste und praktischste Methode, da Art und Anteil der Bindemittelphase direkt Dichte, Magnetismus, Wärmeleitfähigkeit, Festigkeit und spezielle Funktionen bestimmen. Dies ist eine entscheidende Dimension, die bei der Kugelauswahl klar definiert werden muss. Derzeit sind W-Ni-Fe- und W-Ni-Cu-Legierungskugeln die beiden ausgereiftesten und am weitesten verbreiteten industriellen Systeme, die nahezu alle gängigen Anforderungen abdecken.

#### 3.1.1 W-Ni-Fe-Legierungskugeln

W-Ni-Fe-Legierungskugeln bestehen aus Wolfram als Hauptkomponente und Nickel-Eisen als Bindemittelphase in einem spezifischen Mischungsverhältnis. Sie sind derzeit die am häufigsten hergestellten, leistungsstärksten und am weitesten verbreiteten Wolframlegierungskugeln. Nickel sorgt primär für eine ausgezeichnete Benetzbarkeit, wodurch sich die Wolframpartikel während des Flüssigphasensinterns vollständig neu anordnen und ein dichtes Gerüst bilden können. Die Zugabe von Eisen verstärkt die nickelbasierte Bindemittelphase zusätzlich und erzielt so ein optimales Verhältnis zwischen Festigkeit und Zähigkeit. Nach dem Sintern weist dieses System eine typische Zweiphasenstruktur auf: Harte Wolframpartikel verbinden sich zu einem durchgehenden Gerüst, während die Nickel-Eisen-Mischkristallphase die Zwischenräume ausfüllt und die einzelnen Wolframpartikel überbrückt. Dadurch werden sowohl eine extrem hohe Dichte als auch eine Duktilität bei Raumtemperatur und eine Schlagzähigkeit erreicht, die die von reinem Wolfram deutlich übertreffen.

Aufgrund der Nickel-Eisen-Bindemittelphase weisen die Kugeln dieses Systems typischerweise einen schwachen Magnetismus auf. Dieser schwache Magnetismus stört jedoch in den meisten industriellen Gegengewichten, Auswuchtblöcken von Baumaschinen, Ölventil-Gewichtskugeln, Rennwagen-Schwungrädern, Siebkugeln und Gegengewichten für große rotierende Maschinen nicht, sondern dient im Gegenteil der einfachen Identifizierung und Sortierung. Dank ihrer hohen Festigkeit und Härte weisen W-Ni-Fe-Kugeln eine extrem lange Lebensdauer unter wiederholten Stößen, hoher Rollbelastung und Hochtemperaturreibung auf, wobei die Oberfläche weniger anfällig für Ermüdungsabplatzungen oder plastische Verformung ist. Hersteller optimieren häufig das Nickel-Eisen-Verhältnis, um ein präziseres Gleichgewicht zwischen Festigkeit und Zähigkeit zu erzielen: Ein etwas höherer Eisengehalt führt zu höherer Festigkeit, geeignet für statische Gegengewichte mit hoher Belastung; ein etwas höherer Nickelgehalt sorgt für bessere Zähigkeit, geeignet für dynamisches Hochgeschwindigkeits-Auswuchten.

Im zivilen Bereich haben sich W-Ni-Fe-Kugeln aufgrund ihrer kontrollierbaren Kosten, der stabilen Verfügbarkeit und der zuverlässigen Leistung zum dominierenden Werkstoff für Angelgewichte, Golfballkopfkerne, Gegengewichte für Sportgeräte und hochwertige automatische Uhrenrotoren entwickelt. Im industriellen Bereich finden sie breite Anwendung in Gegengewichten für Brückenkabel, Ausgleichsgewichten für Aufzüge, Schiffsballast und Präzisionsmessgewichten.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.1.2 W-Ni-Cu-Legierungskugeln

W-Ni-Cu-Legierungskugeln verwenden Kupfer anstelle von Eisen als Hauptbindemittel. Dadurch wird Magnetismus vollständig eliminiert, was sie zur einzigen Wahl für alle elektromagnetisch empfindlichen Anwendungen macht. Kupfer und Wolfram bilden zudem keine ferromagnetischen Phasen, und Kupfer selbst ist vollständig nichtmagnetisch. Der Nickelgehalt wird ebenfalls streng innerhalb eines sicheren Bereichs kontrolliert, um Magnetismus zu verhindern. Dies führt letztendlich zu einer relativen magnetischen Permeabilität der Kugeln, die sich dem Vakuumniveau annähert. Dank dieser vollständig nichtmagnetischen Eigenschaft können sie uneingeschränkt in der Peripherie von MRT-Geräten, PET-CT- und SPECT-Kollimatoren, Schwingungsdämpfungsblöcken für optische Präzisionsplattformen, hochpräzisen Waagen und allen wissenschaftlichen Instrumenten mit extrem hohen Anforderungen an die Magnetfeldreinheit eingesetzt werden.

Beim Sintern bildet die Kupferphase ein durchgehendes oder halbdurchgehendes Netzwerk. Dadurch werden die Kugeln nicht nur vollständig antimagnetisch, sondern ihre thermische und elektrische Leitfähigkeit wird auch deutlich verbessert. Dies macht sie ideal für Anwendungen, die eine schnelle Wärmeableitung oder Ableitung statischer Elektrizität erfordern. Die hervorragende Beständigkeit von Kupfer gegenüber atmosphärischer Korrosion sorgt zudem dafür, dass W-Ni-Cu-Kugeln auch in feuchten, salzhaltigen oder schwach sauren/alkalischen Umgebungen eine glänzende Oberfläche mit nahezu keiner Oxidation oder Verfärbung aufweisen – eine Eigenschaft, die insbesondere für Medizinprodukte und Reinraumausrüstung von großem Wert ist.

In der Medizin haben sich W-Ni-Cu-Kugeln als Standardfüllmaterial für Kollimatoren in der Strahlentherapie, Fokussierblenden des Gamma Knife und Abschirmungskomponenten verschiedener medizinischer Linearbeschleuniger etabliert. Sie bieten eine extrem hohe Gammastrahlenabsorption, ohne die Magnetresonanztomographie zu beeinträchtigen. In der Präzisionstechnik werden sie als Massenblöcke für Magnetschwebbahnen, Gegengewichte für seismische Detektoren, Schwingungsisolationssysteme für Laserinterferometer und Kalibriergewichte für hochwertige Analysenwaagen eingesetzt. Auch bei Premium-Konsumgütern, wie beispielsweise Rotoren von mechanischen Luxusuhren und Schwingungsdämpferfüße für Hi-Fi-Anlagen, werden zunehmend W-Ni-Cu-Kugeln verwendet, um den potenziellen Einfluss von Magnetismus auf schwache Signale vollständig zu eliminieren. Es ist diese einzigartige Kombination aus „hoher Dichte + vollständiger Nichtmagnetismus + Korrosionsbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit“, die W-Ni-Cu-Legierungskugeln zu einem unangefochtenen Marktführer in Sachen elektromagnetischer Reinheit und medizinischer Sicherheit gemacht hat und sie zu einem der technologisch fortschrittlichsten und wertvollsten Vertreter in der Familie der Wolframlegierungskugeln macht.

### 3.1.3 W-Cu-Legierungskugeln

W-Cu-Legierungskugeln werden mittels eines pulvermetallurgischen Kupferinfiltrationsverfahrens hergestellt. Wolframpartikel werden zunächst zu einem porösen Gerüst gesintert, anschließend wird geschmolzenes Kupfer vollständig in die Poren infiltriert, wodurch eine typische Pseudo-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Legierungsstruktur entsteht. Die Kupferphase und das Wolfram sind nicht ineinander löslich, sondern mikroskopisch fest eingebettet. Dadurch entsteht eine perfekte Verbindung der hohen Härte und Dichte des Wolframs mit der ausgezeichneten thermischen und elektrischen Leitfähigkeit des Kupfers. Aufgrund ihres typischerweise hohen Kupfergehalts weisen W-Cu-Kugeln eine etwas geringere Gesamtdichte als W-Ni-Fe- und W-Ni-Cu-Systeme auf, besitzen aber dennoch die höchste thermische und elektrische Leitfähigkeit aller Wolframlegierungskugeln. Wärme und Strom können innerhalb des Kupfernetzwerks nahezu ungehindert geleitet werden, was W-Cu zum bevorzugten Material für Anwendungen macht, die sowohl hohe Dichte als auch extreme Wärmeableitung erfordern. In Elektronikgehäusen mit hoher Leistungsdichte, Kühlkörpern für 5G-Basisstationsfilter, Wärmeleitpads für Chip-Testsockel und Kugeln für Widerstandsschweißelektroden mit hohen Strömen können W-Cu-Kugeln lokal hohe Temperaturen schnell ableiten und so Risse oder Leistungsverlechterungen durch thermische Spannungskonzentrationen verhindern.

Die Kupferphase verleiht den Kugeln zudem eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion. Bei Anwendungen mit häufigem Schalten hoher Ströme, wie z. B. Hochspannungs-Vakuumschaltern, Thyristorkontakten und EDM-Elektroden, schmilzt und verdampft die Oberfläche von W-Cu-Kugeln unter Lichtbogenbeanspruchung nur geringfügig. Das Wolframgerüst stützt die neue Oberfläche sofort, gewährleistet einen stabilen Kontaktwiderstand und verlängert die Lebensdauer deutlich im Vergleich zu reinem Kupfer oder Kupferlegierungen. Die Oberfläche lässt sich leicht mit Silber oder Gold beschichten, wodurch Kontaktwiderstand und Oxidationsneigung weiter reduziert werden. W-Cu-Legierungskugeln sind zu unverzichtbaren Hochleistungskugeln in der modernen Leistungselektronik, in elektrischen Kontakten für den Schienenverkehr und in High-End-Schweißgeräten geworden und nehmen eine führende Position in Bereichen ein, die ein optimales Verhältnis zwischen Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Lichtbogenbeständigkeit erfordern.

#### 3.1.4 W-Ag-Legierungskugeln

W-Ag-Legierungskugeln werden auch mittels Silberinfiltration hergestellt. Obwohl Silber einen niedrigeren Schmelzpunkt als Kupfer aufweist, ist seine elektrische und thermische Leitfähigkeit höher als die von Kupfer, und es besitzt eine stärkere Oxidationsbeständigkeit im Vakuum oder in inerter Atmosphäre. Daher ist es die erste Wahl für Anwendungen mit hohen Anforderungen an die elektrische Kontaktleistung.

Die Silberphase bildet im Inneren der Kugel ein engmaschiges, leitfähiges Netzwerk. Dadurch weisen W-Ag-Kugeln den niedrigsten spezifischen Widerstand und die höchste Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion aller metallischen Werkstoffe auf. Selbst bei Stoßströmen von Tausenden Ampere verdampft das Silber nur geringfügig, und das Wolframgerüst bildet rasch neue, stabile Kontaktflächen. So wird sichergestellt, dass der Kontaktwiderstand mit der Anzahl der Schaltvorgänge kaum ansteigt. Diese Eigenschaft macht W-Ag zu einem zentralen Kontaktmaterial für Hochspannungs-Gleichstromrelais, Hochleistungs-Vakuumleistungsschalter und elektrische Steckverbinder in Luft- und Raumfahrtqualität.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Duktilität von Silber sorgt zudem für hervorragende Beständigkeit gegen Kaltverlöten und Selbstreinigungseigenschaften. Es neigt weniger zu Anhaftungen oder Kohlenstoffablagerungen in Umgebungen mit häufigem Einsetzen/Entfernen oder Vibrationen und eignet sich daher besonders für präzise elektrische Kontaktanwendungen mit extrem hohen Anforderungen an Zuverlässigkeit und Lebensdauer. Gleichzeitig besitzt Silber selbst antibakterielle Eigenschaften mit einem breiten Wirkungsspektrum, was W-Ag-Kugeln einen natürlichen Vorteil in hygieneempfindlichen Anwendungen wie medizinischen Elektrogeräten und Lebensmittelverarbeitungsmaschinen verschafft. Obwohl es die teuersten Materialien sind, sichert seine unübertroffene umfassende elektrische Kontaktleistung W-Ag-Legierungskugeln einen festen Platz an der Spitze der High-End-Kontaktmaterialien.

### 3.1.5 Sonstige Komponenten: Kugeln aus Wolframlegierung

Wolframlegierungskugeln mit unterschiedlichen Zusammensetzungen, die speziell auf besondere Arbeitsbedingungen zugeschnitten sind, haben ebenfalls eine stabile Massenproduktion oder Kleinserienfertigung erreicht und stellen die neueste Erweiterung des Wolframlegierungskugel-Materialsystems in Richtung Funktionalisierung und extremer Anwendungen dar.

Wolframlegierungskugeln, die mit Neutronenabsorbieren dotiert sind, enthalten Elemente mit hohem Einfangquerschnitt wie Bor, Gadolinium und Samarium, die gezielt in eine W-Ni-Fe- oder W-Ni-Cu-Matrix eingebettet sind. Dadurch erreichen die Kugeln eine exzellente Neutronenabsorptionskapazität bei gleichzeitig hoher Gamma-Abschirmung. Sie werden häufig in Behandlungsräumen der Nuklearmedizin, in Abschirmschichten von Forschungsreaktoren und in Behältern für radioaktive Isotope eingesetzt, um einen integrierten Schutz gegen gemischte Strahlungsfelder zu gewährleisten.

Durch die Zugabe geringer Mengen von Rhenium oder Molybdän lässt sich die Rekristallisationstemperatur und die Festigkeit bei hohen Temperaturen deutlich erhöhen. Dadurch behalten die Kugeln ihre Härte und Formstabilität auch bei Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius und darüber hinaus bei. Dies macht sie geeignet für Hochtemperaturlager, Warmwalzteile sowie Gegengewichte und bewegliche Teile in Hochtemperatur-Vakuumgeräten.

Yttrium, Lanthan und Cer werden Wolframlegierungskugeln modifiziert. Diese verbessern die Korngrenzen, verfeinern die Wolframpartikel und hemmen die Bestrahlungsschwellung, wodurch die strukturelle Stabilität unter Langzeitbestrahlung deutlich erhöht wird. Sie finden hauptsächlich Anwendung in Komponenten von Targetkammern medizinischer Beschleuniger und in Einbauten von Hochfluss-Isotopenreaktoren.

Nanokristalline oder amorphe Wolframlegierungskugeln stellen ein zukunftsweisendes Forschungsgebiet dar. Durch schnelle Erstarrungs- oder mechanische Legierungsprozesse werden ultrafeine oder sogar amorphe Phasen erzeugt, wodurch die Kugeln bei gleichzeitig hoher Dichte eine höhere Festigkeit und Verschleißfestigkeit erreichen. Sie werden bereits in Hochleistungsanwendungen wie Rotoren für hochwertige Uhren und Schwingungsdämpfungskugeln für Präzisionsinstrumente eingesetzt. Diese speziellen Wolframlegierungskugeln zeichnen sich durch geringe Produktionsmengen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



und hohe Kosten aus. Sie haben die Anwendungsbereiche von Wolframlegierungskugeln erheblich erweitert und diese erfolgreich von traditionellen Gegengewichtsmaterialien mit hoher Dichte in hochgradig anpassbare multifunktionale Präzisionsbauteile verwandelt. Damit demonstrieren sie vollumfänglich die unendliche Erweiterbarkeit und das technische Potenzial des Wolframlegierungskugelsystems.

### 3.2 Klassifizierung von Wolframlegierungskugeln nach Präzision

Präzision ist der wichtigste Qualitätsstandard für Wolframlegierungskugeln und bestimmt unmittelbar deren Eignung für Anwendungen wie Wälzkontakt, dynamisches Auswuchten, Strahlungskollimation und die Erfüllung optischer Anforderungen. Die Branche unterscheidet klar zwischen Präzisions- und Standardqualität, wobei sich die beiden Qualitätsstufen hinsichtlich Schleifverfahren, Prüfmethoden sowie Endleistung und Preis deutlich unterscheiden.

#### 3.2.1 Präzisionskugeln aus Wolframlegierung

Präzisionsgefertigte Wolframlegierungskugeln repräsentieren den höchsten Stand der aktuellen Verarbeitungstechnologie für Wolframlegierungskugeln. Ihre Kugelform, Rundheit, Oberflächenrauheit und Chargenkonsistenz werden innerhalb extrem strenger Toleranzbereiche kontrolliert und erfüllen somit die anspruchsvollsten Anforderungen in der High-End-Medizintechnik, bei Präzisionsinstrumenten, wissenschaftlichen Experimenten und hochwertigen Konsumgütern.

Der Produktionsprozess nutzt mehrstufiges, progressives Diamantschleifen in Kombination mit magnetorheologischem Polieren oder ultraschallunterstützter Feinschleiftechnik. Vom Grobschleifen bis zum Hochglanzpolieren sind typischerweise mehr als zehn Schritte erforderlich, die jeweils unter konstanten Bedingungen hinsichtlich Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Reinheit durchgeführt werden. Die Kugel wird in jeder Phase mittels hochpräzisen Laserscanning oder optischen Interferometern in Echtzeit überwacht, um sicherzustellen, dass Abweichungen schrittweise beseitigt und nicht akkumuliert werden. Die fertige Oberfläche weist einen spiegelglatten Glanz mit praktisch keinen sichtbaren Schleifspuren und einer seidenweichen Haptik auf.

Diese extreme Präzision zeigt sich erstmals in Kollimatoren der Nuklearmedizin und Fokussiersystemen für die Strahlentherapie: Nur Präzisionskugeln aus Wolframlegierung gewährleisten die geometrische Konsistenz von Zehntausenden Mikrokanälen und ermöglichen so die punktgenaue Fokussierung des Gammastrahls, wodurch Streuinterferenzen und Dosisverluste vermieden werden. In Bereichen wie automatischen Rotoren für hochwertige mechanische Uhren, Drehtischen für Lasergyroskope, Schwingungsdämpfungsmassen für optische Isolationsplattformen und nationalen metrologischen Normalgewichten sorgen Präzisionskugeln für eine gleichmäßige Massenverteilung im Mikrogrammbereich und einen dynamischen Ausgleich im Submikrometerbereich. Dadurch behält das System auch unter extrem leisen oder Hochgeschwindigkeitsbedingungen seine perfekte Stabilität. Präzisionskugeln aus Wolframlegierung werden üblicherweise in kleinen, hochwertigen Chargen geliefert und in vakuumversiegelten Einzelfläschchen oder stickstoffgefüllten Boxen verpackt. Jede

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kugel ist mit einer eindeutigen Seriennummer und einem vollständigen Prüfbericht versehen. Sie sind nicht nur Werkstoffe, sondern auch zentrale Funktionskomponenten von wissenschaftlichen Präzisionsinstrumenten. Ihre Verarbeitung ist deutlich aufwendiger und kostspieliger als bei gewöhnlichen Kugeln, dennoch bieten sie unersetzliche Garantien für die medizinische Sicherheit, die Genauigkeit wissenschaftlicher Forschung und die High-End-Fertigung.

### 3.2.2 Wolframlegierungskugeln gewöhnlicher Güte

Standard-Wolframlegierungskugeln sind für den industriellen und zivilen Massenmarkt bestimmt. Durch präzise Fertigung werden funktionale Anforderungen mit Kosten und Produktionsmenge in Einklang gebracht, was sie zur weltweit meistgelieferten Kategorie von Wolframlegierungskugeln macht. Ihre Verarbeitung ist relativ einfach und erfolgt typischerweise in großvolumigen horizontalen oder vertikalen Mühlen mit Keramikugeln oder Stahlkugeln für die Chargenvermahlung. Ergänzend werden Siebe und Wirbelstromprüfung eingesetzt, um Oberflächenfehler zu entfernen. Die Oberfläche weist ein gleichmäßiges, mattes oder seidenmattes Finish ohne sichtbare Kratzer oder Poren auf und ist für die meisten Anwendungen als Gegengewicht und für Walzvorgänge mit niedrigen bis mittleren Geschwindigkeiten ausreichend. Obwohl die Toleranzen für Kugelform und Durchmesser nicht so streng sind wie bei Präzisionskugeln, übertreffen sie die von herkömmlichen gegossenen Blei- oder Stahlkugeln deutlich. Dadurch eignen sie sich hervorragend für Anwendungen wie Gegengewichte für Baumaschinen, Schiffsballast, Aufzugsgegengewichte, schwere Kugeln für Ölventile, Kugeln für Vibrationssiebe, Angelbleie und Golfschlägerkopfkerne.

Standardqualitätskugeln werden mit Fokus auf Chargengleichmäßigkeit und Wirtschaftlichkeit hergestellt. Sie werden üblicherweise lose in Kilogramm- oder Tonnenmengen oder in einfachen Plastikbeuteln verpackt. Die Prüfung basiert hauptsächlich auf Stichproben, und die Berichte enthalten lediglich Durchschnittswerte und Bereiche. Diese Vorgehensweise ermöglicht es dem Hersteller, schnell auf Großbestellungen zu äußerst wettbewerbsfähigen Preisen zu reagieren und ist somit der wichtigste Träger für den Bleiersatz in Wolframlegierungskugeln.

Obwohl Standard-Wolframlegierungskugeln nicht so präzise sind wie Präzisionskugeln, sind sie in Kernmerkmalen wie Dichte, Härte und Korrosionsbeständigkeit mit diesen identisch. Lediglich bei der Oberflächengüte und den geometrischen Toleranzen werden vertretbare Kompromisse eingegangen. Diese Philosophie des „Gut genug ist gut genug“ hat weltweit die breite Anwendung umweltfreundlicher, hochdichter Werkstoffe vorangetrieben und eine solide Grundlage für ökologische Modernisierungen geschaffen – von der Schwerindustrie bis hin zu alltäglichen Konsumgütern.

### 3.3 Klassifizierung von Wolframlegierungskugeln nach Anwendungsbereich

Die Klassifizierung nach Anwendung ist der relevanteste Weg, Werkstoffe anhand der Endnutzerbedürfnisse zu kategorisieren und Materialeigenschaften direkt in einen spezifischen technischen Nutzen zu übersetzen. Aktuell werden in der Industrie drei Hauptanwendungskategorien anerkannt: Gegengewichtskugeln aus Wolframlegierung, Abschirmungskugeln aus Wolframlegierung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Lagerkugeln aus Wolframlegierung. Diese decken über 90 % der tatsächlichen Anwendungsszenarien für Wolframlegierungskugeln ab.

### 3.3.1 Gegengewichtskugeln aus Wolframlegierung

Gegengewichtskugeln aus Wolframlegierungen sind die am häufigsten produzierte und am weitesten verbreitete Kategorie innerhalb der Wolframlegierungskugelfamilie. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, maximale Masse bei minimalem Volumen zu erzielen und dadurch Produktminiaturisierung, kompakte Bauweise und optimierte dynamische Eigenschaften zu ermöglichen. Ob Gegengewichte in schweren Maschinen, schwere Kugeln in Ölbohrventilen, Schiffskielballast, Gegengewichtssysteme für Aufzüge oder Schwungräder für Rennwagen, Golfballkerne, Angelbleie oder automatische Rotoren in mechanischen Luxusuhren – Gegengewichtskugeln aus Wolframlegierungen sind aufgrund ihres unübertroffenen Volumen-Masse-Verhältnisses das unersetzliche Material der Wahl.

Diese Kugeln bestehen typischerweise aus W-Ni-Fe- oder W-Ni-Cu-Systemen und zeichnen sich durch höchste Dichte und standardisierte Oberflächen aus. Dabei wird streng auf Kostenkontrolle geachtet, um ein optimales Verhältnis zwischen Leistung und Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten. In schnell rotierenden Uhrwerksrotoren oder Rennwagen-Schwungrädern konzentrieren Gegengewichtskugeln das Trägheitsmoment auf einen sehr kleinen Radius und verbessern so die Energiespeichereffizienz und die Reaktionsgeschwindigkeit deutlich. Bei statischen Lasten, wie z. B. in Brückensattel- und Turmdrehkran-Gegengewichten, erzielen sie denselben Ausgleichseffekt mit einem deutlich geringeren Volumen als Blei oder Beton. Dies spart erheblich Platz und Transportkosten. Ihre Umweltfreundlichkeit ist ein entscheidender Vorteil beim Ersatz von Bleiprodukten: Ihre vollständig ungiftigen und recycelbaren Eigenschaften erfüllen problemlos die strengsten EU-RoHS-Richtlinien, die nordamerikanischen Verbraucherschutzbestimmungen und die chinesischen Umweltstandards. Gegengewichtskugeln aus Wolframlegierung sind hochgradig standardisiert. Hersteller halten üblicherweise Kugeln in verschiedenen Durchmesserreihen auf Lager, sodass Anwender lediglich das gewünschte Gewicht und den Einbauraum angeben müssen, um schnell die optimalen Spezifikationen zu finden. Diese einfache Handhabung („Plug-and-Play“) in Kombination mit den Vorteilen „kleinste Größe, höchstes Gewicht, umweltfreundlich und ungiftig“ hat Gegengewichtskugeln aus Wolframlegierung zu einem der erfolgreichsten und am weitesten verbreiteten Produkte im Zuge der Bleisubstitutionswelle der letzten zwei Jahrzehnte gemacht.

### 3.3.2 Kugeln aus Wolframlegierung in Abschirmqualität

Wolframlegierungskugeln in Abschirmqualität sind speziell für den Strahlenschutz entwickelt worden. Ihr Hauptvorteil liegt in der maximalen Abschirmwirkung gegen Gammastrahlen, Neutronen oder Mischstrahlung bei minimalem Volumen und Gewicht. Sie sind die kompaktesten und umweltfreundlichsten Abschirmmaterialien für moderne medizinische Anlagen, industrielle Prüfgeräte und kerntechnische Einrichtungen.

In Behandlungsräumen für medizinische Linearbeschleuniger, PET-CT-Maschinenräumen, Gamma-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Knife-Geräten, Dunkelkammern für die Fehlererkennung in industriellen CT-Systemen sowie in Behältern zur Lagerung und zum Transport radioaktiver Isotope werden typischerweise Wolframlegierungskugeln in Abschirmqualität in mehrschichtige Abschirmwände, Drehtüren, lokal verstärkte Bereiche oder bewegliche Abschirmbehälter eingefüllt. Dadurch entsteht eine dichte, aber dennoch flexible und anpassbare Schutzstruktur. Im Vergleich zu herkömmlichen Bleiblöcken enthält das Material nur etwa zwei Drittel des Bleivolumens bei gleicher Abschirmwirkung. Dies reduziert das Gewicht erheblich und ermöglicht die Miniaturisierung und den modularen Aufbau der Geräte. Die absolut ungiftigen, kriechfesten und spritzfreien Eigenschaften des Materials eliminieren vollständig das Risiko einer Bleikontamination und langfristiger Verformung.

Bei gemischten Strahlungsfeldern, die eine gleichzeitige Abschirmung von Gammastrahlen und Neutronen erfordern, werden Abschirmkugeln häufig aus modifizierten, mit Elementen wie Bor und Gadolinium dotierten Materialien hergestellt, um eine integrierte Gamma-Neutronen-Abschirmung zu erreichen. Die sphärische Geometrie bietet zudem Vorteile bei der Streuunterdrückung: Die natürlich entstehenden gekrümmten Kanäle zwischen den Kugeln verlängern effektiv die Ausbreitungswege von Photonen und Neutronen und erhöhen so den Gesamtdämpfungsfaktor. Bei Abschirmtüren und der Füllung um das Bleiglas von Beobachtungsfenstern, die häufig geöffnet werden müssen, erleichtert die Fließfähigkeit der Wolframlegierungskugeln die Installation und Wartung erheblich.

Wolframlegierungskugeln in Abschirmqualität müssen typischerweise nichtmagnetische oder schwachmagnetische Eigenschaften aufweisen, um Störungen des Magnetfelds von Bildgebungsgeräten zu vermeiden. Daher haben sich W-Ni-Cu-Systeme und mit Absorbermaterialien modifizierte W-Ni-Cu-Kugeln als Standard etabliert. Ihre Oberflächen werden speziellen Passivierungs- oder Goldplattierungsverfahren unterzogen, um die Streuung von Sekundärelektronen und Photonen weiter zu reduzieren. Sie werden in hochwertigen Kleinserien geliefert, wobei jeder Serie ein detaillierter Bericht zur Überprüfung der Abschirmleistung beiliegt. Dies macht sie zum effizientesten, umweltfreundlichsten und zuverlässigsten Abschirmmedium im modernen medizinischen und industriellen Strahlenschutz.

### 3.3.3 Kugeln aus Wolframlegierung für Lager

Kugellagerkugeln aus Wolframlegierungen stellen die High-End-Anwendung von Wolframlegierungskugeln in Präzisions-Bewegungsteilen dar. Ihre Aufgabe ist es, unter extremen Belastungen, in korrosiven Medien oder in Hochtemperatur-Vakuumumgebungen eine extrem lange Lebensdauer und extrem niedrige Reibung zu erreichen. Dies wird durch ihre extrem hohe Härte, ausgezeichnete Verschleißfestigkeit und Dauerfestigkeit ermöglicht. Unter anspruchsvollen Betriebsbedingungen, bei denen herkömmliche Industrielager an ihre Grenzen stoßen – beispielsweise in Pumpen für starke Säuren und Laugen, Tiefseeanlagen, Hochdruckpumpen für Meerwasserentsalzung, chemischen Mischbehältern und Getrieben für Hochtemperatur-Vakuumöfen – bieten Kugellagerkugeln aus Wolframlegierungen eine um ein Vielfaches höhere Lebensdauer als herkömmliche Stahlkugeln. Grund dafür ist ihre Härte und chemische Stabilität, die die von Wälzlagerstahl deutlich übertrifft. Das harte Gerüst der Wolframpartikel widersteht effektiv Mikrorisskorrosion und Lochfraß, während die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Zähigkeit der Bindemittelphase die bei Keramikugeln häufig auftretende Sprödbbruchbildung verhindert. Dadurch wird eine extrem hohe Zuverlässigkeit in Umgebungen mit Stößen und Vibrationen gewährleistet.

In Anwendungen, die extrem niedrige Reibungskoeffizienten und extrem hohe Drehzahlen erfordern, wie z. B. ultraschnelle zahnärztliche Handstücke, Hochgeschwindigkeitsspindeln und Präzisionszentrifugen, erreichen Präzisionskugeln aus Wolframlegierung nach Hochglanzpolieren und spezieller Oberflächenmodifizierung nahezu keramikähnliche, niedrige Reibungswerte unter Öl- oder Magerölbedingungen. Ihre hohe Dichte ermöglicht zudem eine bessere Kontrolle der Zentrifugalkraft und erleichtert das Erreichen des dynamischen Gleichgewichts. Ihre Stärken spielen sie insbesondere in Vakuum- und Hochtemperaturlagern aus. Wolframlegierungskugeln weisen selbst bei Hunderten von Grad Celsius nur minimale Härte- und Festigkeitsverluste auf, und ihre Bindemittelphase verflüchtigt sich nicht und verkohlt nicht wie Schmierfett. Daher sind sie die erste Wahl für Vakuummechanismen in der Luft- und Raumfahrt, Halbleiterbeschichtungsanlagen und Getriebekomponenten in Hochtemperatur-Wärmebehandlungsöfen. Wolframlegierungskugeln für Lager unterliegen extrem hohen Anforderungen an Präzision, Konsistenz und Oberflächengüte und werden typischerweise nach Präzisions- oder sogar Ultrapräzisionsstandards gefertigt. Jede Kugel wird einer Wirbelstromprüfung und einer optischen Inspektion in Originalgröße unterzogen. Die Oberfläche wird häufig mit einer DLC-Beschichtung (diamantähnlicher Kohlenstoff) oder einem MoS<sub>2</sub>-Festschmierstoff behandelt, um Reibung und Verschleiß weiter zu reduzieren. Sie werden in extrem kleinen Mengen zu extrem hohen Stückpreisen geliefert, bieten aber revolutionäre Verbesserungen hinsichtlich Lebensdauer und Wartungsintervallen für kritische Anlagen und haben sich zu einem unverzichtbaren Kernmaterial für Kugellager in der modernen High-End-Fertigung und für bewegliche Teile unter besonderen Betriebsbedingungen entwickelt.

### 3.3.4 Gesundheitsball aus Wolframlegierung

#### Die historischen Ursprünge und kulturellen Konnotationen von Gesundheitskugeln aus Wolframlegierung.

Gymnastikbälle, als traditionelles Gesundheitsinstrument, blicken auf eine jahrhundertealte Geschichte in den östlichen Zivilisationen zurück. Anfänglich wurden Naturmaterialien wie Walnüsse und Jade verwendet. Mit der Entwicklung der Metallurgie wurden Metalle nach und nach zu einem wichtigen Werkstoff für die Herstellung von Gymnastikbällen. Gymnastikbälle aus Wolframlegierung, die moderne Technologie und traditionelle Gesundheitskonzepte vereinen, führen nicht nur alte kulturelle Traditionen fort, sondern stellen auch bedeutende Fortschritte in der Materialwissenschaft und den Fertigungsprozessen dar. Diese Entwicklung spiegelt das kontinuierliche Streben der Menschheit nach einem gesunden Lebensstil und ihre fortwährende Erforschung der Funktionalität von Hilfsmitteln wider. Aus kultureller Sicht verkörpert die Verwendung von Gymnastikbällen tiefgründige philosophische Gedanken: Ihre Rotationsbewegung symbolisiert die traditionellen Konzepte des Kreislaufs von Himmel und Erde sowie die Harmonie von Yin und Yang und trägt durch die regelmäßige Bewegung der Hände zu einem Zustand körperlichen und geistigen Gleichgewichts bei.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

In der heutigen Gesellschaft wurde der kulturelle Wert von Gymnastikbällen aus Wolframlegierung neu interpretiert und weiterentwickelt. Ihre exquisite Verarbeitung und ihr einzigartiges Design vereinen nicht nur praktische Funktionen, sondern sind auch zu einem kulturellen Symbol und einer Kunstform geworden. Viele hochwertige Gymnastikbälle sind mit traditionellen Mustern oder Kalligrafien verziert und verbinden so auf perfekte Weise künstlerische Ästhetik mit Fitnessfunktion. Diese kulturelle Bedeutung hebt Gymnastikbälle aus Wolframlegierung über gewöhnliche Fitnessgeräte hinaus und macht sie zu einem wichtigen Medium für die Verbreitung traditioneller Kultur. Gleichzeitig wächst mit dem zunehmenden Gesundheitsbewusstsein die Nutzerbasis der Gymnastikbälle stetig, und ihre kulturelle Bedeutung wird durch die Nutzung kontinuierlich erweitert und aktualisiert. Nutzer unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Herkunft haben durch dieses Gerät Brücken des kulturellen Austauschs geschlagen und so ein einzigartiges kulturelles Phänomen geschaffen.

Aus gesellschaftlicher Sicht hat die Verwendung und Verbreitung von Gesundheitsbällen aus Wolframlegierung die Popularisierung von Konzepten für einen gesunden Lebensstil gefördert. In Gemeinschaftsveranstaltungen und Gesundheitsvorträgen werden Gesundheitsbälle häufig als Anschauungsmaterial eingesetzt, um die Teilnehmer zu Handgesundheit und Ganzkörperkoordinationstraining anzuregen. Diese subtile Form der Gesundheitserziehung trägt positiv zur Verbesserung der Gesundheitskompetenz der Bevölkerung bei. Darüber hinaus hat die Gesundheitsball-Kultur die Entwicklung verwandter Branchen gefördert und eine vollständige Wertschöpfungskette von der Materialforschung und -entwicklung über die Prozessinnovation und die Anwendungshinweise bis hin zur kulturellen Förderung geschaffen. Dieser Prozess generiert nicht nur wirtschaftlichen Wert, sondern bewahrt und entwickelt vor allem die traditionelle Gesundheitskultur weiter und verleiht ihr in der modernen Gesellschaft neue Bedeutung.

### **Eine perfekte Kombination aus Materialeigenschaften und ergonomischem Design**

Die Besonderheit des Gymnastikballs aus Wolframlegierung liegt vor allem in seinen einzigartigen Materialeigenschaften. Als hochdichtes Metall zeichnet sich Wolframlegierung durch hervorragende physikalische und chemische Eigenschaften aus. Dank seiner hohen Dichte bietet der Gymnastikball ein optimales Gewicht bei relativ geringem Volumen. Dieses optimierte Verhältnis von Gewicht zu Volumen sorgt für die ideale Trainingsbelastung. Die Härte und Verschleißfestigkeit des Materials gewährleisten eine dauerhafte Oberflächenbeschaffenheit und Formstabilität während des Gebrauchs, sodass Abnutzungserscheinungen das Benutzererlebnis nicht beeinträchtigen. Gleichzeitig passt sich die hervorragende Wärmeleitfähigkeit der Wolframlegierung schnell der Temperatur der Handfläche an und sorgt so für ein angenehmes Gefühl. Das Zusammenspiel dieser Materialeigenschaften bildet die Grundlage für die Funktionalität des Gymnastikballs.

Beim Design des Gymnastikballs aus Wolframlegierung wurden ergonomische Prinzipien vollständig berücksichtigt. Der Durchmesser des Balls ist präzise berechnet, um ausreichend Bewegungsfreiheit zu gewährleisten und sich an verschiedene Handgrößen anzupassen. Die Oberflächenbehandlung erfolgt in einem speziellen Verfahren, das einen bestimmten Reibungskoeffizienten beibehält, um ein Abrutschen zu verhindern und gleichzeitig übermäßige Rauheit zu vermeiden, die zu Beschwerden in der Hand

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

führen könnte. Die Gewichtsverteilung ist sorgfältig ausgelegt, um einen stabilen Schwerpunkt und eine gleichmäßige Rotationsbahn zu gewährleisten. Einige High-End-Produkte verfügen zudem über ein hohles Design mit einem internen Klangerzeuger, der beim Rotieren ein klares, angenehmes Geräusch erzeugt. Dieses akustische Feedback steigert nicht nur den Trainingsspaß, sondern hilft den Nutzern auch, den Rhythmus ihrer Übungen zu finden.

Moderne Gymnastikbälle aus Wolframlegierung verfügen über intelligente Funktionen. Einige Modelle sind mit Bewegungssensoren ausgestattet, die Daten wie Umdrehungszahl und Trainingsdauer erfassen und drahtlos mit Mobilgeräten synchronisieren. Nutzer können ihre Trainingsdaten über eine App analysieren und personalisierte Fitnesstipps erhalten. Diese Kombination aus traditionellen Fitnessgeräten und moderner Technologie erweitert die Einsatzmöglichkeiten von Gymnastikbällen erheblich. Um den spezifischen Bedürfnissen verschiedener Nutzergruppen gerecht zu werden, haben Hersteller zudem eine Produktpalette entwickelt: von Basismodellen für Einsteiger über medizinische Modelle für das Rehabilitationstraining bis hin zu High-End-Modellen für Profis. Dieses differenzierte Design spiegelt eine nutzerzentrierte Designphilosophie wider und ermöglicht es, dass Gymnastikbälle aus Wolframlegierung die Bedürfnisse eines breiteren Nutzerkreises erfüllen.

### **Präzisionsanforderungen an den Fertigungsprozess und die Qualitätskontrolle**

von Wolframlegierungskugeln für den Gesundheitsbereich umfasst mehrere präzise Arbeitsschritte, die jeweils eine strenge Qualitätskontrolle erfordern. Die Dosierung und Aufbereitung der Rohstoffe sind grundlegend für die Qualität des Endprodukts. Hochreines Wolframpulver und andere Legierungselemente müssen in spezifischen Verhältnissen formuliert und mithilfe moderner Mischanlagen gleichmäßig verteilt werden. Im Formgebungsprozess wird isostatisches Pressen eingesetzt, um eine gleichmäßige Dichte in alle Richtungen des Rohlings zu gewährleisten und innere Defekte zu vermeiden. Der Sinterprozess ist der Kern des gesamten Herstellungsverfahrens und erfordert eine präzise Steuerung des Temperaturprofils und der Atmosphäre, damit die Pulverpartikel durch Diffusion eine dichte Metallstruktur bilden können. Jede Abweichung von den Parametern während dieses Prozesses kann zu einer Beeinträchtigung der Produktleistung führen.

Die Endbearbeitung spielt eine entscheidende Rolle für die Qualität der Gesundheitskugel. Durch mehrere Schleifvorgänge werden Oberflächenfehler schrittweise beseitigt, um die erforderliche Maßgenauigkeit und Oberflächengüte zu erreichen. Besonderes Augenmerk muss auf die Kontrolle der Schnittparameter beim Schleifen gelegt werden, um Mikrorisse oder Spannungsspitzen zu vermeiden. Der Polierprozess muss nicht nur einen spiegelglatten Glanz erzielen, sondern auch die geometrische Genauigkeit der Kugel erhalten. Bei klangerzeugenden Gesundheitskugeln erfordern die Bearbeitung des Innenraums und der Einbau des Klangerzeugers höchste Präzision, um einen klaren, angenehmen Klang mit moderater Lautstärke zu gewährleisten. Die abschließende Oberflächenbehandlung, wie z. B. Galvanisierung oder Lackierung, muss sowohl ästhetischen Ansprüchen genügen als auch der Haltbarkeit und Biokompatibilität der Beschichtung gerecht werden.

Ein umfassendes Qualitätskontrollsystem durchzieht den gesamten Fertigungsprozess. Von der

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

Rohmateriallagerung bis zur Auslieferung des fertigen Produkts gelten in jeder Phase strenge Prüfstandards. Moderne Prüfgeräte wie 3D-Messgeräte und Akustikanalysatoren werden in der Produktion eingesetzt, um die Produktqualität in Echtzeit zu überwachen. Besonders wichtig ist die Prüfung der dynamischen Eigenschaften des Gesundheitsballs, einschließlich verschiedener Indikatoren wie Rotationsbalance, Klangqualität und Oberflächenbeständigkeit. Hersteller müssen zudem ein lückenloses Rückverfolgbarkeitssystem etablieren, um sicherzustellen, dass jedes Produkt seiner spezifischen Produktionscharge und den entsprechenden Prozessparametern zugeordnet werden kann. Diese strengen Qualitätskontrollmaßnahmen gewährleisten nicht nur die Produktleistung, sondern bieten den Anwendern auch zuverlässige Sicherheit. Dank des technologischen Fortschritts in der Fertigung setzen führende Unternehmen bereits intelligente Fertigungssysteme ein, um Produktionsprozesse kontinuierlich zu optimieren und die Stabilität und Konsistenz der Produktqualität durch Datenanalyse und maschinelles Lernen zu verbessern.

### **Wissenschaftliche Analyse der Wirksamkeit und des gesundheitlichen Nutzens**

Die Wirkung von Massagebällen aus Wolframlegierung basiert auf wissenschaftlichen Prinzipien und wirkt auf verschiedene physiologische Systeme ein. Die Hand, eine der nervenreichsten Körperregionen, kann durch die regelmäßige Bewegung des Balls Akupunkturpunkte und Reflexzonen stimulieren und so die Funktionen der entsprechenden inneren Organe regulieren. Diese Stimulation beruht auf dem Prinzip der Nervenreflexe, die über Rückenmark und Hirnstamm zur Großhirnrinde weitergeleitet werden und so einen vollständigen neuronalen Regelkreis bilden. Gleichzeitig erfordert die Rotationsbewegung das koordinierte Zusammenspiel mehrerer Muskelgruppen in der Hand. Dieses Feinmotoriktraining trägt zur Erhaltung und Verbesserung der Handmotorik bei und ist besonders vorteilhaft zur Vorbeugung und Linderung degenerativer Veränderungen der Handgelenke.

Aus sportmedizinischer Sicht ist das Training mit dem Gymnastikball ein kontinuierliches, leichtes Ausdauertraining. Diese Trainingsform eignet sich für Menschen jeden Alters, insbesondere aber für Menschen mittleren und höheren Alters. Die regelmäßige Drehbewegung fördert die Durchblutung der oberen Extremitäten und verbessert die periphere Blutversorgung, wodurch Symptomen wie kalten und tauben Händen vorgebeugt wird. Darüber hinaus erfordert diese Übung ein hohes Maß an Konzentration und Hand-Augen-Koordination; langfristiges, konsequentes Training trägt zur Verbesserung der Reaktionsgeschwindigkeit und der Koordination des Nervensystems bei. Einige Studien haben zudem gezeigt, dass das Training mit dem Gymnastikball positive Auswirkungen auf den Erhalt und die Verbesserung der kognitiven Funktionen hat, möglicherweise aufgrund der Förderung der Hirndurchblutung und der Neuroplastizität.

Aus psychologischer Sicht bietet die Verwendung von Gymnastikbällen aus Wolframlegierung einen einzigartigen Mehrwert. Ihre rhythmische Rotation wirkt meditativ und hilft Nutzern, sich zu entspannen und Stress abzubauen. Der klare Klang sorgt für ein angenehmes Hörerlebnis und schafft gleichzeitig eine ruhige und friedliche Atmosphäre. Viele Nutzer berichten, dass sie während des Trainings mit dem Gymnastikball ein Gleichgewicht zwischen Körper und Geist erreichen – eine Erfahrung, die sich äußerst positiv auf das psychische Wohlbefinden auswirkt. Aus

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



präventivmedizinischer Sicht kann regelmäßiges Training mit dem Gymnastikball ein wichtiger Bestandteil eines umfassenden Gesundheitsmanagements sein und eignet sich besonders gut zur Selbstregulation im heutigen schnelllebigen Alltag. Um die optimalen gesundheitlichen Vorteile zu erzielen, ist es wichtig, die korrekte Anwendungsmethode zu beherrschen und regelmäßig zu trainieren, idealerweise mit einem individuell auf Sie zugeschnittenen Trainingsplan, der unter professioneller Anleitung erstellt wurde.

### 3.3.5 Wolframlegierungskugeln für medizinische Kollimatoren

#### Grundprinzipien und funktionelle Anforderungen von Wolframlegierungskugeln für medizinische Kollimatoren

In modernen Medizingeräten beeinflusst der Kollimator als Kernkomponente von Strahlentherapie- und Bildgebungssystemen unmittelbar die Genauigkeit und Sicherheit medizinischer Eingriffe. Ein Kollimator ist ein Gerät, das mithilfe einer speziellen Struktur die räumliche Verteilung eines Strahls steuert und dabei das Prinzip der selektiven Transmission von Strahlungspartikeln nutzt. In komplexen medizinischen Anwendungen muss der Kollimator die Strahlungsfeldverteilung präzise an die jeweiligen klinischen Bedürfnisse anpassen, um sicherzustellen, dass die Strahlendosis exakt auf das Zielgebiet projiziert wird und gleichzeitig die Bestrahlung des umliegenden gesunden Gewebes minimiert wird. Diese präzise Steuerung ist entscheidend für die Verbesserung der Diagnose- und Behandlungsergebnisse und die Reduzierung des Komplikationsrisikos.

Wolframlegierungskugeln spielen eine entscheidende Rolle in Kollimatorsystemen. Ihre Funktionalität beruht auf präzisen mechanischen Strukturen und fortschrittlichen Steuerungssystemen. Durch spezifische Anordnungen und Bewegungsmechanismen können diese Kugeln die Öffnung und Schließung des Strahlengangs dynamisch anpassen und so eine Echtzeitmodulation des Strahls ermöglichen. In Diagnosegeräten müssen Kollimatoren eine gleichmäßige Strahlungsfeldverteilung gewährleisten, um eine stabile Bildqualität sicherzustellen. In Therapiegeräten hingegen müssen sie eine dreidimensionale, konforme Strahlendosisverteilung erreichen und das Zielgewebe präzise abdecken. Diese funktionelle Vielseitigkeit stellt extrem hohe Anforderungen an die Fertigungspräzision und Bewegungssicherheit der Wolframlegierungskugeln. Jede noch so kleine Maßabweichung oder Bewegungsfehler kann zu Verzerrungen der Strahlungsfeldverteilung und damit zu Beeinträchtigungen des Behandlungserfolgs führen.

Aus Sicht der Systemintegration erfordert die Funktionalität von Wolframlegierungskugeln in Kollimatoren die Zusammenarbeit mit mehreren Subsystemen. Das Antriebssteuerungssystem muss eine präzise Kugelpositionierung gewährleisten, das Überwachungssystem muss Echtzeit-Feedback zum Bewegungsstatus der Kugel liefern und das Sicherheitssystem muss in Ausnahmesituationen rechtzeitig Schutzmaßnahmen ergreifen. Diese systemübergreifende Zusammenarbeit setzt voraus, dass Wolframlegierungskugeln nicht nur über hervorragende physikalische Eigenschaften verfügen, sondern auch eine gute Kompatibilität und Zuverlässigkeit mit den umgebenden Komponenten aufweisen. Mit der fortschreitenden Entwicklung der Präzisionsmedizin stellen moderne Kollimatoren zunehmend

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

höhere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Wolframlegierungskugeln, darunter höhere Bewegungsgenauigkeit, schnellere Reaktionszeiten und längere Lebensdauer. Diese Anforderungen treiben die kontinuierliche Innovation und Weiterentwicklung der Fertigungstechnologie für Wolframlegierungskugeln voran.

## Wolframlegierungskugeln

Die Materialauswahl für medizinische Kollimatoren basiert auf strengen wissenschaftlichen Bewertungen und langjährigen praktischen Erfahrungen. Wolframlegierungen gelten aufgrund ihrer einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften als ideales Material für die Herstellung von Kollimatorkugeln. Im Hinblick auf die Strahlenabschirmung weisen Wolframlegierungen exzellente Massenschwächungskoeffizienten und hohe lineare Absorptionskoeffizienten auf und blockieren so effektiv verschiedene Arten von Strahlungspartikeln. Diese Abschirmwirkung beruht auf der hohen Ordnungszahl und der ausreichenden Materialdichte von Wolfram, wodurch die Wolframlegierungskugel mit relativ geringer Dicke die gewünschte Schutzwirkung erzielt. Gleichzeitig weisen Wolframlegierungen auch hervorragende mechanische Eigenschaften auf, insbesondere eine hohe Festigkeit und Härte. Dies gewährleistet, dass die Kugel auch bei langfristiger Anwendung formstabil bleibt und ihre Maßgenauigkeit beibehält.

Die thermophysikalischen Eigenschaften des Materials sind ein weiterer wichtiger Aspekt. Im Betrieb medizinischer Geräte kann das Kollimatorsystem, insbesondere unter Volllast, unterschiedlichen Wärmebelastungen ausgesetzt sein. Wolframlegierungen zeichnen sich durch hervorragende thermische Stabilität und Wärmeleitfähigkeit aus. Dadurch können sie die entstehende Wärme schnell abführen und Dimensionsänderungen oder Leistungseinbußen durch Temperaturschwankungen vermeiden. Darüber hinaus sind die Korrosions- und Dauerfestigkeit von Wolframlegierungen bemerkenswert und gewährleisten die langfristige Zuverlässigkeit der Kugel in komplexen medizinischen Umgebungen. Es ist wichtig zu beachten, dass unterschiedliche Zusammensetzungen von Wolframlegierungen zu Leistungsunterschieden führen. Daher muss die am besten geeignete Materialzusammensetzung je nach Anwendungsfall ausgewählt werden, um ein optimales Gleichgewicht zwischen Abschirmwirkung, mechanischen Eigenschaften und Verarbeitungsaufwand zu erzielen.

Aus Sicht der Materialherstellung beginnt die Qualitätskontrolle von Wolframlegierungen mit der Auswahl und Vorbehandlung der Rohstoffe. Hochreines Wolframpulver und Legierungszusätze erfordern strenge Zusammensetzungsanalysen und Prüfungen der physikalischen Eigenschaften, um eine gleichbleibende Qualität von Charge zu Charge zu gewährleisten. In der Pulvermetallurgie beeinflusst die Kontrolle der Prozessparameter direkt das Mikrogefüge und die endgültigen Materialeigenschaften. Eine gleichmäßige Kornverteilung, eine geeignete Porosität und eine gute Grenzflächenhaftung sind entscheidende Indikatoren für die Herstellung hochwertiger Wolframlegierungen. Moderne Materialanalyseverfahren wie Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenbeugung liefern eine wissenschaftliche Grundlage für die Bewertung der Materialeigenschaften. Mithilfe dieser fortschrittlichen Analysemethoden können wir ein tieferes Verständnis des Zusammenhangs zwischen Materialzusammensetzung, Struktur und Eigenschaften gewinnen und so eine theoretische Grundlage

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

für die Materialoptimierung und -auswahl schaffen.

### Präzisionsfertigungsprozess und Qualitätskontrollsystem

Die Herstellung von Wolframlegierungskugeln für medizinische Kollimatoren ist ein systematisches Ingenieurprojekt, das Materialwissenschaft, Präzisionsbearbeitung und Qualitätskontrolle integriert. Der Fertigungsprozess beginnt mit der Pulvermetallurgie, in der durch präzise Steuerung des Pulververhältnisses, des Formdrucks und der Sinterparameter ein Rohling mit idealer Dichte und Mikrostruktur entsteht. Die Prozessoptimierung in dieser Phase erfordert die umfassende Berücksichtigung des Verdichtungsverhaltens des Materials, der Kornwachstumskinetik und der Diffusionsmechanismen der Legierungselemente, um sicherzustellen, dass der Rohling die erforderlichen physikalischen Eigenschaften aufweist und gleichzeitig innere Defekte und Eigenspannungen minimiert werden. Der gesinterte Rohling wird anschließend präzisionsbearbeitet, um schrittweise die gewünschten geometrischen Abmessungen und die Oberflächenqualität zu erzielen. Dieser Prozess beinhaltet die kombinierte Anwendung verschiedener Bearbeitungsverfahren und die Feinabstimmung der Prozessparameter.

In der Endbearbeitungsphase liegt der Fokus des Fertigungsprozesses auf der Kontrolle der geometrischen Genauigkeit und der Sicherstellung der Oberflächenintegrität. Durch CNC-Schleifen und Polieren werden Rundheit, Durchmesserkonstanz und Oberflächenrauheit der Kugeln innerhalb von Mikrometertoleranzen präzise kontrolliert. Die technologische Herausforderung besteht in dieser Phase darin, einen effizienten Materialabtrag bei gleichzeitiger Vermeidung von Bearbeitungsschäden zu gewährleisten. Eine sinnvolle Prozessablaufplanung, die Optimierung der Schnittparameter sowie geeignete Kühl- und Schmierbedingungen sind entscheidend für die Bearbeitungsqualität. Besonders wichtig ist die strikte Kontrolle der Wärmeeinflusszone und der mechanischen Spannungen während der Bearbeitung, um Veränderungen der Mikrostruktur oder Beschädigungen der Oberflächenintegrität zu verhindern. Diese minimalen Defekte können die Langzeitstabilität der Kugeln unter Strahlungseinwirkung beeinträchtigen.

Ein umfassendes Qualitätskontrollsystem durchdringt den gesamten Fertigungsprozess und etabliert ein vollständiges Set an Prüfstandards und Überwachungsmethoden. Von der Rohmateriallagerung bis zur Auslieferung des fertigen Produkts verfügt jede Phase über klar definierte Qualitätskontrollpunkte. Geometrische Abmessungen werden mit hochpräzisen 3D-Messgeräten erfasst, die Oberflächenqualität mit modernsten Mikroskopen und Profilometern beurteilt und die Materialeigenschaften durch professionelle physikalisch-chemische Analysen verifiziert. Zusätzlich zu den Routineprüfungen werden Funktionstests durchgeführt, um die Leistung unter realen Einsatzbedingungen zu simulieren. Die Anwendung statistischer Prozesskontrollmethoden ermöglicht die Echtzeitüberwachung und zeitnahe Anpassung von Qualitätsschwankungen während des Fertigungsprozesses.

### Standards für Leistungsvalidierung und klinische Anwendung

Die Bewertung von Wolframlegierungskugeln für medizinische Kollimatoren ist ein mehrdimensionaler

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und systematischer Prozess, der eine umfassende Berücksichtigung physikalischer, mechanischer und funktionaler Eigenschaften erfordert. Die Überprüfung der physikalischen Leistungsfähigkeit konzentriert sich auf die Bewertung des Ansprechverhaltens der Kugel unter Strahlungsbedingungen, einschließlich Parametern wie Strahlungsdurchlässigkeit, Streuverhalten und Dämpfungseffizienz. Diese Tests werden typischerweise in experimentellen Aufbauten durchgeführt, die reale Einsatzbedingungen simulieren. Dabei kommen standardisierte Messmethoden und Referenzsysteme zum Einsatz, um die Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit der Testergebnisse zu gewährleisten. Die Überprüfung der mechanischen Leistungsfähigkeit konzentriert sich auf Indikatoren wie die Bewegungsgenauigkeit, die Verschleißfestigkeit und die Dauerfestigkeit der Kugel. Beschleunigte Alterungstests und Langzeitstabilitätstests dienen der Beurteilung der Fähigkeit der Kugel, ihre Leistungsfähigkeit innerhalb ihrer erwarteten Lebensdauer beizubehalten.

Die Überprüfung der Funktionsfähigkeit ist ein entscheidender Schritt, um sicherzustellen, dass Wolframlegierungskugeln den klinischen Anforderungen entsprechen. Dieser Prozess umfasst zwei Phasen: Einzelprüfung und Systemintegrationsprüfung. In der Einzelprüfung liegt der Fokus auf der Bewertung der grundlegenden Funktionsparameter der Kugel, wie z. B. Bewegungsflexibilität, Positioniergenauigkeit und Wiederholgenauigkeit. Die Systemintegrationsprüfung integriert die Kugel in ein komplettes Kollimatorsystem, um ihre Leistung in einer realen Arbeitsumgebung zu bewerten. Diese Phase beinhaltet komplexere Tests, darunter dynamisches Ansprechverhalten, Genauigkeit koordinierter Bewegungen und Anpassungsfähigkeit an die Umgebung. Die Analyse und Interpretation der Testdaten erfordert Fachwissen und Erfahrung. Dabei liegt der Fokus nicht nur auf der Einhaltung quantitativer Indikatoren, sondern auch auf der qualitativen Beobachtung von Anomalien, um potenzielle Risiken vollständig zu identifizieren und wirksam zu beherrschen.

Die Etablierung und Verbesserung von Standards für klinische Anwendungen sind eine entscheidende Grundlage für die Gewährleistung der Patientensicherheit. Diese Standards werden in der Regel von spezialisierten Organisationen entwickelt und umfassen verschiedene Aspekte, darunter Materialauswahl, Fertigungsprozesse, Leistungsanforderungen und Prüfmethoden. Die Einhaltung dieser Standards spiegelt sich nicht nur in der Konformität des Endprodukts wider, sondern muss während des gesamten Design-, Fertigungs- und Validierungsprozesses sichergestellt werden. Mit dem Fortschritt der Medizintechnik und der zunehmenden klinischen Erfahrung werden diese Standards kontinuierlich aktualisiert und überarbeitet, um sich an neue technologische Entwicklungen und klinische Bedürfnisse anzupassen. Zusätzlich zur Einhaltung etablierter Standards und Spezifikationen etablieren Hersteller auch strengere interne Kontrollstandards, um die Produktsicherheit und -wirksamkeit kontinuierlich zu verbessern. Dieses unermüdliche Streben nach Qualität spiegelt das hohe Verantwortungsbewusstsein der Medizintechnikbranche für die Patientensicherheit wider.

### 3.3.6 Wolframlegierungskugeln für Trägheitskomponenten in der Luft- und Raumfahrt

Wolframlegierungskugeln für Trägheitskomponenten in der Luft- und Raumfahrt werden hauptsächlich in Schwungrad-Energiespeichersystemen von Satelliten, Lageregelungsaktuatoren von Raumstationen und hochpräzisen optoelektronischen Stabilisierungsplattformen eingesetzt. Sie sind

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Schlüsselkomponenten, um geringe Abmessungen, hohe Trägheitsmomente und stabile Rotation bei hohen Geschwindigkeiten zu erzielen.

Diese Kugeln weisen typischerweise große Durchmesser und extrem hohe Dichteanforderungen auf. Häufig wird ein W-Ni-Fe-System verwendet, um ein optimales Volumen-Masse-Verhältnis zu erzielen. Die Oberflächenpräzision ist überragend, und die Kugeln durchlaufen spezielle dynamische Auswucht- und Vakuumentgasungsprozesse, um jegliche Vibrationen oder Gasaustritte während der Hochgeschwindigkeitsrotation zu verhindern. Die Kugeln werden präzise in die Felgen von Schwungrädern aus Titanlegierung oder Kohlefaser eingelassen oder geklebt. Dadurch erreichen die Schwungräder bei gleichen Außenabmessungen deutlich höhere Energiespeicherdichten als Stahl oder Aluminium. Dies verbessert die Manövrierfähigkeit und die Lebensdauer des Satelliten im Orbit erheblich.

Sie werden zu Standardkomponenten in Tiefraumsonden, optischen Fernerkundungssatelliten und kommerziellen Kleinsatellitenkonstellationen. Sie funktionieren zuverlässig über lange Zeiträume im Vakuum, bei starken Temperaturschwankungen und in Umgebungen mit hoher Strahlung, ohne an Dichte zu verlieren, Risse zu bilden oder flüchtige Stoffe freizusetzen. Dadurch bieten sie Raumfahrzeugen eine stabile, präzise und geräuschlose Speicherung und einen störungsfreien Austausch von Drehimpuls. Angesichts des zunehmenden Trends zur Miniaturisierung und hohen Mobilität von Satelliten steigt die Nachfrage nach diesen Wolframlegierungskugeln explosionsartig an.

### 3.3.7 Zivile Wolframlegierungskugeln (z. B. Angelbleie)

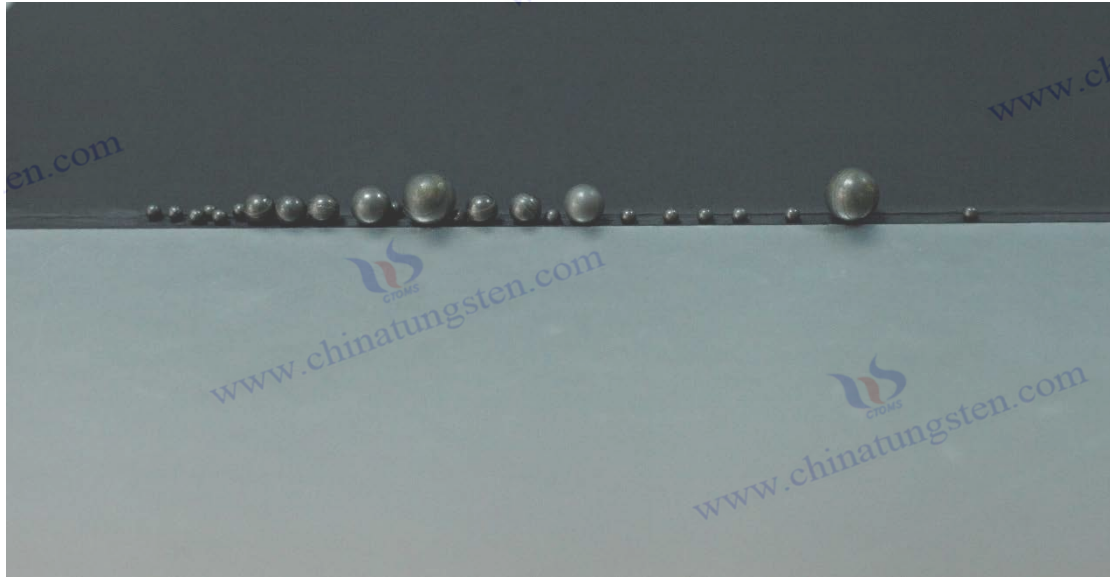
Wolframlegierungskugeln für den zivilen Gebrauch sind vor allem als Angelbleie bekannt, finden aber auch in vielen anderen Bereichen Anwendung, beispielsweise als Gewichte für Golfschlägerköpfe, Modellbausätze und Spielzeug. Sie sind die preisgünstigste Art von Wolframlegierungskugeln und haben sich in Tausenden von Haushalten etabliert.

Wolframlegierungskugeln für Angelbleie bestehen typischerweise aus einer Standard-W-Ni-Fe-Legierung und sind mit einer umweltfreundlichen Beschichtung oder Schwärzung versehen. Dadurch bleibt die metallische Textur erhalten, während gleichzeitig eine leichte Oxidation der freiliegenden Wolframlegierung bei längerem Einsatz unter Wasser verhindert wird. Im Vergleich zu herkömmlichen Bleigewichten haben Wolframlegierungsgewichte nur ein Drittel bis die Hälfte des Volumens von Blei, wiegen aber gleich viel oder sogar mehr. Angler können sie so mit weniger Wasserwiderstand schnell zum Grund sinken lassen und die Verluste durch Hänger deutlich reduzieren. Die höhere Härte macht das Gewicht zudem weniger anfällig für Verformungen auf felsigem oder muschelartigem Untergrund, was seine Lebensdauer erheblich verlängert.

Wolframlegierungskugeln finden breite Anwendung im Kern von Golfbällen, als Gegengewichte in ferngesteuerten Modellautos und als Ausgleichskugeln in magnetischen Kinderspielzeugen. Sie ermöglichen eine kompaktere Form und eine präzisere Schwerpunktkontrolle. Die Oberfläche ist oft mit farbigem Harz oder weichem Gummi beschichtet, was sowohl ästhetisch ansprechend als auch

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

unbedenklich ist und die strengsten europäischen und amerikanischen Normen zur Schwermetallbelastung von Spielzeug erfüllt. Wolframlegierungskugeln für den zivilen Markt sind stark marktorientiert geworden. Verschiedene Farben, Spezifikationen und Verpackungsoptionen sind auf E-Commerce-Plattformen erhältlich und bieten erschwingliche Preise und eine große Auswahl. Diese Kugeln ermöglichen es Endverbraucher, die „konzentrierte Essenz“ von Wolframlegierungen auf direktem Wege zu erleben und haben sich zum wichtigsten Exportmedium und gleichzeitig zum wichtigsten Instrument für die Umweltwerbung der Wolframlegierungskugelindustrie entwickelt.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungskugeln

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Kapitel 4 Herstellungsverfahren für Wolframlegierungskugeln

### 4.1 Rohmaterialvorbehandlung von Wolframlegierungskugeln

Die Rohmaterialvorbehandlung ist der grundlegendste und zugleich entscheidendste Schritt im gesamten Herstellungsprozess von Wolframlegierungskugeln. Ziel ist es, Wolfram- und Bindemittelpulver in ein hochreines Rohmaterial mit einheitlicher Partikelgröße und geeigneter Aktivität umzuwandeln und so eine hochwertige mikroskopische Grundlage für das anschließende Formen und Sintern zu schaffen. Jegliche Restverunreinigungen oder ungleichmäßige Mischungen würden sich in den fertigen Kugeln durch Dichteentmischung, Rissbildung oder Leistungsschwankungen verstärken. Daher betrachten führende Unternehmen die Rohmaterialvorbehandlung als einen zentralen, vertraulichen Prozess.

#### 4.1.1 Reinigung von Wolframpulver aus Wolframlegierungskugeln

Wolframpulver, als Hauptbestandteil von Wolframlegierungskugeln, bestimmt durch seine Reinheit und Partikeleigenschaften direkt die theoretische Obergrenze der Dichte, die maximalen mechanischen Eigenschaften und die Langzeitstabilität der Kugeln. Die industrielle Herstellung beginnt mit blauem oder gelbem Wolfram, dessen Oxid in einem mehrstufigen Wasserstoffreduktionsprozess schrittweise zu metallischem Wolframpulver reduziert wird. Die Reduktion erfolgt stufenweise in einem Schieber- oder Drehrohrofen. In der Niedertemperaturstufe werden vorwiegend flüchtige Verunreinigungen und Kristallwasser entfernt, in der Mitteltemperaturstufe wird das Kornwachstum gesteuert und in der Hochtemperaturstufe die abschließende Reduktion und Oberflächenreinigung durchgeführt.

Nach der Reduktion durchläuft das Wolframpulver strenge chemische und gasförmige Reinigungsprozesse. Säurewäsche und mehrfaches Waschen mit Wasser entfernen lösliche Verunreinigungen wie Kalium, Natrium und Silicium, während Hochtemperatur-Vakuum-Entgasung oder eine sekundäre Wasserstoffreduktion schädliche gasförmige Elemente wie Sauerstoff, Kohlenstoff, Schwefel und Phosphor gründlich entfernen. Führende Verfahren nutzen sogar Zonenschmelz- oder Plasmareinigungstechnologien, um extrem hohe Reinheitsgrade des Wolframpulvers zu erreichen und den Sauerstoffgehalt auf nahezu nicht nachweisbare Werte zu senken.

Die Kontrolle von Partikelgröße und -morphologie ist gleichermaßen entscheidend. Die Fisher-Partikelgrößenverteilung muss in einem engen Bereich liegen; zu feines Pulver führt zu einem zu hohen Sauerstoffgehalt und ungleichmäßiger Sinterschrumpfung, während zu grobes Pulver die Sinteraktivität und die Verdichtungsrate verringert. Durch Luftstrom-, Sedimentations- oder Wirbelstromklassierung wird Wolframpulver präzise in Partikelgrößenbereiche gesiebt, die den Anforderungen spezifischer Legierungssysteme entsprechen.

#### 4.1.2 Elementare Proportionierung und Mischung von Wolframlegierungskugeln

Die richtige Dosierung und Mischung der Elemente sind entscheidende Schritte bei der Umwandlung von Wolframpulver mit Bindemittelpulvern wie Nickel, Eisen und Kupfer sowie gegebenenfalls

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Spurenelementen in ein homogenes Kompositpulver. Der Grad der Homogenität bestimmt direkt, ob es bei den Sinterkugeln zu Dichteentmischungen, Anreicherungen der Bindemittelphase oder zu Schwankungen der Leistung zwischen verschiedenen Chargen kommt.

Die Formulierung erfolgt in einem Reinraum der Klasse 10.000. Zunächst wird jedes Elementpulver mit einer hochpräzisen elektronischen Waage entsprechend der Zielzusammensetzung abgewogen. Nickel-, Eisen- und Kupferpulver werden zudem einer Wasserstoffreduktion und Vakuumentgasung unterzogen, um Reinheit und Aktivität zu gewährleisten. Spurenadditive wie Kobalt, Molybdän, Seltenerdelemente oder Boride werden in Form von Vorlegierungen oder vorlegierten Pulvern zugegeben, um Fehler und ungleichmäßige Verteilung durch direktes Wiegen zu vermeiden. Der Mischprozess ist entscheidend für die endgültige Homogenität. Traditionelle V-Mischer wurden zunehmend durch hochenergetische Planetenkugelmøhlen, Doppelkegel-Hochleistungsmischer oder dreidimensionale Wirbelmischer ersetzt. Diese Geräte erzielen sowohl makroskopische als auch mikroskopische Homogenität, entweder ohne Mahlkörper oder mit weichen Mahlkörpern. Mischzeit und Drehzahl müssen präzise aufeinander abgestimmt sein: Eine zu kurze Mischzeit führt zu einer lokalen Anreicherung der Bindemittelphase, während eine zu lange Mischzeit übermäßige Kaltverformung und Sauerstoffkontamination zur Folge hat. Einige High-End-Produktionslinien nutzen zudem die Sprühtrocknungsgranulation, um nahezu kugelförmige Kompositpartikel mit exzellenter Fließfähigkeit herzustellen und so die Dichtehomogenität des gepressten Vorformlings weiter zu verbessern.

Um eine Pulverschichtung zu verhindern, werden unmittelbar nach dem Mischen Spuren von Paraffinwachs oder Polyethylenglykol bzw. anderen Formungsmitteln hinzugefügt. Anschließend wird die Mischung in einem Niedertemperatur-Vakuumofen beschichtet, wodurch jedes Wolframpulverpartikel von einem dünnen organischen Film und dem Bindemittelpulver umschlossen wird. Das fertige Kompositpulver wird durch mehrere Sieblagen gesiebt und in einen mit Helium gefüllten, verschlossenen Behälter gegeben, wo es auf den nächsten Formgebungsprozess wartet. Nun liegt eine Charge hochwertiger Wolframlegierungskugeln auf atomarer Ebene vor, die die optimale Ausgangsbasis für eine Umwandlungsrate von über 90 % der theoretischen Leistung bietet.

## 4.2 Formgebungsprozess von Wolframlegierungskugeln

Der Umformprozess bestimmt die Ausgangsdichte, die Dichtehomogenität und den inneren Spannungszustand von Wolframlegierungsblöcken und ist somit ein entscheidendes Glied in der gesamten Fertigungskette. Aufgrund des extrem hohen Wolframgehalts, der geringen Fließfähigkeit und der hohen Härte ist Wolframlegierungspulver mit herkömmlichen Spritzguss- und Formpressverfahren schwer zu verarbeiten. Daher lassen sich die gängigen und ausgereiften Umformverfahren derzeit in zwei Hauptkategorien einteilen: Kaltpressen und isostatisches Pressen. Jedes Verfahren hat seine spezifischen Schwerpunkte hinsichtlich Anlageninvestitionen, Blockqualität und Anwendungsbereichen.

### 4.2.1 Kaltpressen und isostatisches Pressen von Wolframlegierungskugeln

Das gemischte Wolframlegierungspulver wird direkt in kugelförmige Rohlinge gepresst, die etwas

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



größer als die Endgröße sind. Die Formen bestehen typischerweise aus hochfestem Hartmetall, deren Innenhohlraum spiegelglatt poliert und mit Hartchrom oder diamantartigem Kohlenstoff beschichtet ist, um die Reibung beim Entformen zu reduzieren und ein Anhaften zu verhindern. Der Pressvorgang erfolgt auf vollautomatischen hydraulischen Pulverpressen oder mechanischen Pressen mit Presskräften von mehreren hundert bis zu mehreren tausend Tonnen. Durch die synchrone Bewegung von Ober- und Unterstempel wird eine anfängliche Verdichtung mit relativ gleichmäßiger Dichte erreicht. Zur Verbesserung der Pulverbeschickungseffizienz und der Rohlingskonsistenz werden in einigen Produktionslinien vibrationsunterstützte Pulverbeschickung und Mehrstationen-Rundlaufpressen eingesetzt, die das Pressen von Dutzenden Rohlingen in einem einzigen Arbeitsgang ermöglichen.

Die isostatische Pressung überwindet die Einschränkungen herkömmlicher, einseitiger Krafteinwirkung. Das Pulvergemisch wird zunächst in eine flexible Gummiform oder einen hochelastischen Kunststoffbeutel gefüllt, anschließend vakuumversiegelt und in einen Hochdruckbehälter gegeben. Die echte isotrope Kompression wird durch ein flüssiges Medium erreicht, das den extrem hohen Druck aus allen Richtungen überträgt. Der Druck in Kaltisostatpressanlagen ist typischerweise deutlich höher als bei herkömmlicher Kaltpressung, und das Medium ist häufig eine Öl- oder Wasseremulsion. Die Haltezeit lässt sich flexibel anpassen. Nach dem Pressvorgang wird die Gummihülle abgezogen, wodurch ein nahezu endkontumacher Rohling mit glatter Oberfläche und abgerundeten Kanten zum Vorschein kommt. Es gibt zwei Arten der Kaltisostatpressung: die Trockenbeutel- und die Nassbeutel-Kaltisostatpressung. Erstere eignet sich für die Massenproduktion von Kugeln mit kleinem bis mittlerem Durchmesser, während letztere besser für Rohlinge mit großem Durchmesser oder unregelmäßiger Form geeignet ist.

Beide Formgebungsverfahren erfordern nach dem Pressen ein sofortiges Entwachsen bei niedriger Temperatur, um das Formungsmittel langsam verdampfen oder zersetzen zu lassen und so Blasenbildung und Risse beim anschließenden Sintern zu verhindern. Obwohl die Festigkeit des Grünlings noch relativ gering ist, weist er bereits ausreichende Handhabungs- und Ofenbeladungseigenschaften auf und ist somit optimal für den nächsten Schritt, das Flüssigphasensintern, vorbereitet.

#### 4.2.2 Vergleich der Vor- und Nachteile von Kugelformverfahren aus Wolframlegierungen

Kaltpressen und isostatisches Pressen weisen jeweils unterschiedliche techno-ökonomische Merkmale auf und ergänzen sich, anstatt sich gegenseitig zu ersetzen. Kaltpressanlagen erfordern geringere Investitionen, benötigen weniger Platz, haben kürzere Zykluszeiten und ermöglichen einen kontrollierbaren Werkzeugverschleiß. Dadurch eignen sie sich besonders für die Herstellung von Gegengewichtskugeln mit kleinem bis mittlerem Durchmesser und mittlerer Präzision für zivile Anwendungen sowie von Kugeln in Industriequalität mit einer Jahresproduktion von mehreren Millionen bis zu mehreren zehn Millionen Stück. Obwohl die Schüttdichte etwas geringer ist als beim isostatischen Pressen, lässt sich durch Optimierung der Pulverfließfähigkeit, bidirektionales Pressen und Werkzeugkonstruktion dennoch ein relativ hoher Anteil der theoretischen Dichte erreichen. Damit werden die Anforderungen der meisten Anwendungen für Gegengewichte, Abschirmungen und Lager vollständig erfüllt. Die Produktionslinie ist hochautomatisiert; eine Person kann mehrere Pressen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

überwachen, was zu den niedrigsten Gesamtherstellungskosten führt. Derzeit ist dies das Formgebungsverfahren, das am meisten zur weltweiten Produktion von Wolframlegierungskugeln beiträgt.

Das isostatische Pressen (IP) bietet erhebliche Vorteile hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Vorformlingsdichte, der inneren Spannungsverteilung und der Anpassungsfähigkeit an komplexe Formen. Dank des vollständig isotropen Drucks entstehen im Vorformling praktisch keine Dichtegradienten oder Druckrisse, was nach dem Sintern zu einer ausgezeichneten Schrumpfungskonsistenz führt. Dadurch lassen sich präzise und ultrapräzise Kugelformen im Endprodukt leichter realisieren. Insbesondere Kugeln mit großem Durchmesser profitieren vom IOS; andernfalls würde das unidirektionale Pressen zu deutlichen Delaminationen und Bereichen geringer Dichte an den Enden führen. IOS wird fast ausschließlich für Kugeln in medizinischen Kollimatoren, High-End-Schwungrädern, Füllstoffen für die nukleare Abschirmung und allen hochwertigen Produkten mit strengen Anforderungen an die Chargenkonsistenz eingesetzt. Zu den Nachteilen zählen hohe Investitionskosten für die Anlagen, lange Zykluszeiten und ein hoher Verbrauch an Gummiformen. Das Verfahren eignet sich für die spezialisierte Fertigung von Kugeln mit mittlerer bis hoher Präzision, kleinen bis mittleren Chargen oder großen Abmessungen.

In der Praxis setzen viele führende Unternehmen auf eine Hybridstrategie: Standard- und Gegengewichtskugeln werden mittels Kaltpressverfahren auf Hochgeschwindigkeitsanlagen gefertigt, während Präzisions- und Spezialkugeln auf isostatischen Pressanlagen mit hoher Qualität hergestellt werden. Dadurch wird ein optimales Verhältnis zwischen Kosten und Leistung erzielt. Das Zusammenspiel und die Komplementarität beider Formgebungsverfahren bilden das flexible, effiziente und umfassende Technologiesystem der heutigen Wolframlegierungskugelindustrie.

### 4.3 Sinterprozess von Wolframlegierungskugeln

Das Sintern ist der zentrale Transformationsschritt von Wolframlegierungskugeln, bei dem aus einem losen Rohling ein hochleistungsfähiger, dichter Körper entsteht. Durch präzise Steuerung von Temperatur, Zeit und Atmosphäre erfahren die Wolframpartikel eine Neuordnung, eine Halsbildung und Korngrenzendiffusion, während die Binderphase eine Benetzung durch die flüssige Phase und eine gleichmäßige Verteilung erreicht. Dadurch bildet sich letztendlich eine zweiphasige Verbundstruktur mit extrem hoher theoretischer Dichte. Wolframlegierungskugeln werden üblicherweise durch Flüssigphasensintern hergestellt. Dieses Verfahren hat zwar ein enges Prozessfenster, liefert aber signifikante Ergebnisse und ist daher der technisch anspruchsvollste und risikoreichste Schritt im gesamten Prozess.

#### 4.3.1 Temperatur- und Haltezeitkontrolle von Wolframlegierungskugeln

Die präzise Abstimmung von Temperatur und Haltezeit bestimmt die Menge der flüssigen Phase, den Grad der Wolframpartikelauflösung und -wiederausfällung sowie die Qualität des resultierenden Mikrogefüges. Der Sinterprozess lässt sich im Allgemeinen in vier Phasen unterteilen: Erhitzen und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Entwachsen, Festphasen-Vorsintern, Flüssigphasen-Hauptsintern und kontrollierte Abkühlung.

Die Heiz- und Wachsentransportphase erfolgt extrem langsam, um die vollständige Verdampfung des Formungsmittels ohne Blasenbildung oder Rissbildung zu gewährleisten. In der Festphasen-Vorsinterphase wird die Temperatur unter den Schmelzpunkt der Bindemittelphase erhöht. Dadurch können die Wolframpartikel durch Festkörperdiffusion zunächst Halsverbindungen ausbilden, während gleichzeitig Restgase entfernt werden. Beim Übergang in die Flüssigphasen-Hauptsinterphase übersteigt die Temperatur rasch den Schmelzpunkt der Bindemittelphase, und Nickel-Eisen, Nickel-Kupfer oder Kupfer wandelt sich sofort in eine niedrigviskose flüssige Phase um. Diese flüssige Phase füllt rasch die Zwischenräume zwischen den Wolframpartikeln durch Kapillarkräfte, was zu einer Neuordnung der Partikel und einer deutlichen Erhöhung der Dichte führt. Hierbei muss die Temperatur präzise im optimalen Bereich der flüssigen Phase stabilisiert werden: Eine zu niedrige Temperatur führt zu einer unzureichenden flüssigen Phase, einer ungenügenden Partikelneuordnung und zahlreichen Restporen; eine zu hohe Temperatur führt zu übermäßigem Flüssigkeitsverlust oder abnormalem Wachstum der Wolframpartikel, was eine Agglomeration der Bindemittelphase, eine verringerte Dichte oder sogar einen Zusammenbruch und eine Verformung des Rohlings zur Folge haben kann.

Die Haltezeit ist ebenso entscheidend. Eine zu kurze Haltezeit führt zu unzureichender Auflösung und Wiederausfällung der Wolframpartikel, schlechter Kornform und schwacher Grenzflächenhaftung; eine zu lange Haltezeit führt zu übermäßiger Vergrößerung der Wolframpartikel, verringerter Zähigkeit und potenzieller Flüssigkeitsphasensickerung am Boden des Rohlings, was zu Entmischungen führt. Moderne Produktionslinien nutzen mehrstufige Halte- und dynamische Temperaturregelsysteme mit Glasfaseroptik, um die Temperatur jeder Zone im Ofen in Echtzeit zu überwachen und sicherzustellen, dass Hunderttausende von Rohlingen innerhalb desselben Ofenzyklus nahezu identische thermische Behandlungen durchlaufen. Die Kühlphase erfolgt programmiert und gesteuert – zunächst schnell, dann langsam –, um thermisch spannungsbedingte Mikrorisse zu vermeiden und gleichzeitig das Ausfällungsverhalten der Bindemittelphase zu kontrollieren und so die endgültigen mechanischen Eigenschaften zu optimieren. Der gesamte Sinterprozess dauert oft mehrere zehn Stunden, entscheidet aber darüber, ob die Kugeln ihre theoretischen Leistungsgrenzen erreichen.

#### 4.3.2 Vorteile des Vakuumsinterns von Wolframlegierungskugeln

Wolframlegierungskugeln sind heute Standard. Im Vergleich zum traditionellen Wasserstoffsintern bietet es überwältigende Vorteile hinsichtlich Reinheit, Dichte, Leistungskonstanz und Kompatibilität mit speziellen Komponenten und hat sich zur Standardkonfiguration für Präzisions-, Medizin- und Hochtemperaturkugeln entwickelt.

Die Vakuumumgebung eliminiert vollständig die Probleme der Wasserdampfzirkulation und der unvollständigen Reduktion durch Wasserstoff. Der Sauerstoffpartialdruck im Ofen wird auf ein extrem niedriges Niveau reduziert, und die letzte Oxidschicht, die auf der Oberfläche der Wolframpartikel adsorbiert ist, sowie die Binderphase werden bei hohen Temperaturen zersetzt und verdampft. Dadurch wird eine echte metallische Bindung an der Phasengrenzfläche gewährleistet und spröde Oxideinschlüsse

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

als Festigkeitsschwäche vermieden. Das Vakuum unterdrückt zudem den Verdampfungsverlust der Binderphase bei hohen Temperaturen, was insbesondere für kupfer- und silberbasierte Systeme von Bedeutung ist. Dies verbessert die Präzision der Zusammensetzungskontrolle erheblich und eliminiert nahezu vollständig Schwankungen in Dichte und Leistung zwischen den Chargen.

Unter Vakuum diffundiert das Restgas in den geschlossenen Poren des Rohlings mit steigender Temperatur allmählich und entweicht, bevor es schließlich von der Vakuumpumpe entfernt wird. Dies reduziert die Restporosität der Sinterkugeln deutlich und erleichtert das Erreichen des theoretischen Dichtewerts. Vakuumsinteröfen sind typischerweise mit einer unabhängigen Mehrzonen-Temperaturregelung und Hochgeschwindigkeits-Diffusionspumpen ausgestattet. Die Temperaturhomogenität und die Heiz-/Kühlraten des Ofens übertreffen die von Wasserstoff-Molybdän-Drahtöfen deutlich und ermöglichen präzise thermische Prozesse auch bei großen Füllmengen. Sie eignen sich besonders für die Herstellung von Kugeln mit großem Durchmesser und hoher Wertschöpfung. Für Kugeln mit Seltenerdelementen, Bor, Gadolinium oder Rhenium und Molybdän ist Vakuumsintern die einzige Option. Wasserstoff kann mit diesen reaktiven Elementen reagieren, während ein Vakuum vollständige Inertheit gewährleistet und somit die gewünschte Funktion der Zusätze vollständig erhält. Die Vakuumumgebung während der Abkühlphase verhindert zudem eine erneute Oberflächenoxidation. Dadurch weisen die Kugeln unmittelbar nach dem Entnehmen aus dem Ofen einen reinen, metallischen Glanz auf und können ohne zusätzliche Säurebehandlung direkt dem Mahlprozess zugeführt werden.

Obwohl die Investitions- und Betriebskosten von Vakuumsinteranlagen höher sind als die von Wasserstoffsinteranlagen, machen die reine Grenzfläche, die extreme Dichte, die ultrahohe Konsistenz und die umfassende Prozessabdeckung dieses Verfahren zu einer unersetzlichen Prozessgarantie für medizinische Kollimatorkugeln, Schwungradkugeln für die Luft- und Raumfahrt, nukleare Abschirmkugeln und alle Anwendungsbereiche mit null Toleranz gegenüber der Leistung. Es repräsentiert zudem den aktuellen Stand der Sintertechnologie für Wolframlegierungskugeln.

#### **4.4 Weiterverarbeitung von Wolframlegierungskugeln**

Die Weiterverarbeitung ist der letzte entscheidende Schritt bei der Umwandlung von gesinterten, dichten Rohlingen aus Wolframlegierungskugeln in hochpräzise, oberflächenoptimierte Funktionsprodukte. Sie bestimmt nicht nur die geometrische Genauigkeit und die Oberflächengüte, sondern beeinflusst auch direkt die Dauerfestigkeit, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und die Eignung für spezielle Umgebungen. Schleifen und Polieren sowie eine Oberflächenbehandlung zum Schutz vor Korrosion sind die beiden wichtigsten Prozesse, die nahezu alle hochwertigen Kugeln durchlaufen müssen.

##### **4.4.1 Schleifen und Polieren von Wolframlegierungskugeln**

Die einzige Möglichkeit, Präzisions- oder sogar Ultrapräzisionswerte für Wolframlegierungskugeln zu erreichen, ist ein mehrstufiger mechanisch-chemischer Abtragsprozess, der auch für die Erzielung einer qualifizierten Oberflächenbeschaffenheit gewöhnlicher Kugeln unerlässlich ist. Die gesinterten Rohlinge

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



weisen raue Oberflächen auf, sind zu groß und besitzen eine dünne Oxidschicht. Sie müssen schrittweise durch einen solchen Prozess in die ideale Kugelform gebracht werden.

Die Bearbeitung von Tausenden bis Hunderttausenden von Kugeln erfolgt in einer wasserbasierten Schleifflüssigkeit. Dabei werden Sinterhaut und überschüssiges Material schnell entfernt und die Kugeln vorgeformt. Im Zwischenschleifprozess kommen feinere Siliciumcarbid- oder Aluminiumoxid-Schleifmittel zum Einsatz, und die Anlage schaltet auf hochpräzises spitzenloses Schleifen oder Doppelscheibenschleifen um. Die Kugeln weisen eine gleichmäßige, matte Oberfläche auf, und die Toleranzen hinsichtlich Kugelform und Durchmesser werden deutlich reduziert.

Das Feinschleifen und Polieren erfolgt anschließend in einer Reinraumwerkstatt mit temperierter Temperatur. Hierfür werden Diamantmikropulver oder eine nanoskalige Ceroxid-Suspension auf Polyurethan-Schleifscheiben oder magnetorheologische Poliermaschinen verwendet. Das magnetorheologische Polieren eignet sich besonders für hochpräzise medizinische Kollimatorkugeln und Schwungradkugeln für die Luft- und Raumfahrt, da sich die flexible magnetorheologische Flüssigkeit sofort an die Krümmung der Kugel anpasst und so eine spiegelglatte Oberfläche ohne Kratzer oder Beschädigungen der darunterliegenden Schicht erzielt. Der gesamte Schleif- und Polierprozess ist typischerweise in acht bis fünfzehn Stufen unterteilt, wobei der Materialabtrag in jeder Stufe streng abnimmt und in der letzten Stufe sogar im Nanometerbereich liegt. Zwischen den einzelnen Stufen werden die Kugeln ultraschallgereinigt und optisch automatisch sortiert, um fehlerhafte Produkte mit Kratzern, Poren oder Elliptizität auszusortieren. Das führende Werk hat die vollständige Prozessautomatisierung erreicht: Automatisches robotergestütztes Be- und Entladen, Online-Lasermessung, KI-gestützte visuelle Fehlererkennung und Regelungstechnik ermöglichen eine beispiellose Chargenkonsistenz. Die polierten Kugeln weisen eine spiegelglatte Oberfläche, eine seidenweiche Haptik und ein extrem hohes Reflexionsvermögen auf. Dies erfüllt nicht nur die Anforderungen an die geometrische Genauigkeit, sondern verbessert durch die Beseitigung von Oberflächenmikrorissen und Eigenspannungsschichten auch die Kontaktfestigkeit und Lebensdauer um ein Vielfaches.

#### 4.4.2 Oberflächenkorrosionsbeständige Behandlung von Wolframlegierungskugeln

Obwohl Wolframlegierungen an sich eine gute Beständigkeit gegen atmosphärische Korrosion aufweisen, ist unter rauen Bedingungen wie in Meeresumgebungen, sauren und alkalischen Medien, bei langfristiger Lagerung in feuchter Umgebung oder bei der medizinischen Desinfektion eine zusätzliche Oberflächenbehandlung zum Schutz vor Korrosion erforderlich, um sicherzustellen, dass die Kugeln ihr Aussehen und ihre Leistungsfähigkeit während ihres gesamten Lebenszyklus beibehalten.

Die gebräuchlichsten Methoden sind die chemische und die elektrochemische Passivierung. Durch kurzes Eintauchen der Kugel in ein speziell formuliertes Salpetersäure-Fluorwasserstoffsäure-Gemisch oder eine spezielle Passivierungslösung bildet sich auf ihrer Oberfläche ein extrem dünner und dichter Oxidschutzfilm, der ihre Beständigkeit gegen Lochfraß und Spaltkorrosion deutlich verbessert. Der Film weist eine gleichmäßige dunkelgraue oder blauschwarze Farbe auf und ist daher sowohl ästhetisch

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ansprechend als auch praktisch. Die elektrochemische Passivierung verdickt und verdichtet diesen Film unter kontrolliertem Potenzial zusätzlich und erhöht so seine Korrosionsbeständigkeit weiter.

Kollimatorkugeln und Kugeln für Tiefseeeräte mit höheren Anforderungen werden häufig mittels physikalischer Gasphasenabscheidung (PVD) mit Gold, Titan oder Chrom beschichtet. Die Beschichtung ist nur wenige Mikrometer dick, isoliert die Kugeln aber vollständig vor korrosiven äußeren Medien und reduziert gleichzeitig die Sekundärelektronenemission und Photonenstreuung. Goldbeschichtete Kugeln sind besonders in medizinischen Beschleunigern verbreitet, da sie wiederholter Hochtemperatur-Dampfsterilisation standhalten und gleichzeitig die Stabilität der Röntgenflussberechnungen gewährleisten.

Die vakuumabgeschiedene DLC-Beschichtung (diamantähnlicher Kohlenstoff) hat sich in den letzten Jahren als hochwertige Option etabliert. Ihre extrem hohe Härte und chemische Beständigkeit machen die Kugeln in Meerwasser, starken Säuren und Laugen sowie in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit nahezu korrosionsfrei. Gleichzeitig wird der Reibungskoeffizient deutlich reduziert, wodurch sich die Beschichtung besonders für Kugeln in Hochtemperaturlagern und Chemiepumpen eignet. Vor der Beschichtung sind eine Ionenreinigung und die Abscheidung einer Übergangsschicht erforderlich, um eine ausreichende Haftung für die langfristige Wälz- und Stoßbelastung zu gewährleisten. Nach der Oberflächenbehandlung zum Schutz vor Korrosion werden die Kugeln typischerweise mehrfach ultraschallgereinigt, vakuumgetrocknet und unter Stickstoff verpackt, um jegliche korrosive Rückstände zu entfernen. Nach jahrelangen Tests in Salzsprühkammern oder realen Meeresumgebungen behalten die behandelten Kugeln ihre makellose Oberfläche. Dadurch wird die letzte Schwachstelle von Wolframlegierungskugeln in extrem korrosiven Umgebungen vollständig beseitigt, was sie zu absolut zuverlässigen Funktionsmaterialien für alle Betriebsbedingungen und über ihre gesamte Lebensdauer macht.

#### 4.5 Wichtige Qualitätskontrollpunkte für Wolframlegierungskugeln

Die Herstellung von Wolframlegierungskugeln, vom Rohmaterial bis zum fertigen Produkt, umfasst zahlreiche Schritte. Allerdings bestimmen nur drei Faktoren die Charginqualität, die Leistungskonstanz und das Kundenvertrauen: die Kontrolle der Rohmaterialreinheit, die Kontrolle der Formdichtegleichmäßigkeit und die Stabilitätsprüfung nach dem Sintern. Diese drei Kontrollpunkte sind eng miteinander verknüpft und verstärken sich gegenseitig; keiner darf vernachlässigt werden. Sie gelten in der Branche als die drei kritischen Schwachstellen.

##### 4.5.1 Kontrolle der Reinheit der Rohstoffe für Wolframlegierungskugeln

Die Reinheit der Rohstoffe ist der entscheidende Faktor für die Leistungsfähigkeit von Wolframlegierungskugeln. Schon eine einzige schädliche Verunreinigung kann zu einem schwerwiegenden Fehler im Endprodukt führen. Daher betrachten alle führenden Unternehmen die Rohstoffprüfung als erste, unüberwindbare Hürde.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nach Anlieferung im Werk wird das Wolframpulver chargenweise beprobt und einer hochpräzisen Multielementanalyse mittels Glimmentladungs-Massenspektrometrie, ICP- Spektroskopie und einem ASH-Analysator unterzogen. Chargen, die die zulässigen Grenzwerte überschreiten, werden umgehend zurückgesendet. Die Kontrolle des Sauerstoffgehalts ist besonders streng, da Sauerstoff beim Sintern spröde Oxideinschlüsse bildet, die die Grenzflächenfestigkeit erheblich beeinträchtigen. Auch Nickel-, Eisen- und Kupferbindemittelpulver erfordern Prüfberichte von Drittanbietern und werden stichprobenartig überprüft. Funktionelle Additive werden dem vorlegierten Pulver in Spuren zugesetzt, um eine lokale Über- oder Unterkonzentration durch direktes Wiegen zu vermeiden.

Die Partikelgröße und -morphologie des Pulvers werden mittels Laser-Partikelgrößenanalyse und Rasterelektronenmikroskopie (REM) bestimmt. Die Partikelgrößenverteilung muss innerhalb des vorgegebenen Prozessfensters liegen, und die Morphologie muss polyedrisch oder nahezu kugelförmig sein; längliche oder schuppige Partikel sind ausgeschlossen. Alle Testdaten werden in Echtzeit in das MES-System hochgeladen und permanent mit der Chargennummer verknüpft, wodurch eine vollständige Rückverfolgbarkeit über den gesamten Lebenszyklus gewährleistet ist. Nur Rohstoffe, die alle Indikatoren beim ersten Versuch bestehen, gelangen in den Mischprozess; andernfalls werden sie direkt aussortiert. Diese kompromisslose Kontrolle der Rohstoffreinheit stellt sicher, dass selbst die besten nachfolgenden Prozesse nicht durch inhärente Mängel beeinträchtigt werden.

#### **4.5.2 Kontrolle der Gleichmäßigkeit der Formdichte von Wolframlegierungskugeln**

Die Gleichmäßigkeit der Dichte bestimmt unmittelbar, ob es in den Sinterkugeln zu Entmischungen, Verformungen oder inneren Rissen kommt und ist somit entscheidend für die Qualität des Grünlings. Unternehmen setzen daher mehrdimensionale Verfahren ein, um Dichteschwankungen in einem extrem engen Bereich zu halten.

Beim Kaltpressen überwacht ein hochpräziser Drucksensor in Echtzeit die Presskraftkurve jeder Form. Abweichende Werte lösen sofort einen Alarm aus und führen zur automatischen Entnahme des entsprechenden Pressling. Beim isostatischen Pressen ist ein Dichtemessblock in eine Gummimanschette eingebettet. Nach dem Pressvorgang im selben Ofen wird der Block zerlegt und geprüft, um eine lückenlose Druckübertragung sicherzustellen. Nach dem Entnehmen aus der Form werden die Presslinge einzeln mittels des hochpräzisen Archimedischen Verschiebungsverfahrens oder Röntgendichtemessung geprüft. Presslinge mit Dichteabweichungen außerhalb der Toleranz werden zur erneuten Pressung direkt in den Ofen zurückgeführt.

Um geringfügige Unebenheiten während des Pressvorgangs weiter zu minimieren, betten einige High-End-Produktionslinien extrem feine Thermoelementdrähte in den Rohling ein. Diese überwachen in Echtzeit die Unterschiede in den Erwärmungsraten an verschiedenen Stellen während der Vorsinterphase, um indirekt die Dichtehomogenität zu bestimmen. Jeder fehlerhafte Rohling wird markiert und einzeln behandelt. Dieser mehrstufige Kontrollansatz, der Presskraft, Mediumdruck und indirekte thermische Reaktion umfasst, erzielt eine beispiellose Dichtehomogenität im geformten Rohling und schafft so eine solide Grundlage für eine stabile Schrumpfung während des Sinterprozesses und eine gleichbleibende

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

Endleistung.

#### 4.5.3 Stabilitätsprüfung der Wolframlegierungskugeln nach dem Sintern

Die Stabilitätsprüfung nach dem Sintern ist der letzte Kontrollpunkt, bevor die Wolframlegierungskugeln das Werk verlassen. Ihr Zweck ist es, sicherzustellen, dass jede Charge von Kugeln die technischen Vereinbarungen hinsichtlich Dichte, Härte, Magnetismus, Größe und inneren Defekten vollständig erfüllt und somit jegliches Ausfallrisiko ausgeschlossen wird.

Die Dichtepfung erfolgt nach dem doppelten Sicherheitsprinzip, das die Archimedische Verschiebungsmethode mit einem Ultraschall-Dichtemessgerät kombiniert. Kugeln unterhalb der unteren Grenze werden sofort aussortiert. Die Härteprüfung umfasst Stichproben für Rockwell- oder Vickers-Härteprüfungen, ergänzt durch ein automatisiertes Härtebildgebungssystem zur vollflächigen Oberflächenprüfung. Lokale weiche Stellen führen zu einer sofortigen Nachprüfung der Charge. Die Magnetprüfung ist besonders wichtig für nichtmagnetische Kugeln. Hierbei wird jede Kugel mit einem hochpräzisen Fluxgate-Magnetometer gescannt; Kugeln, die die Norm überschreiten, werden automatisch aussortiert. Größe und Morphologie werden mithilfe einer Koordinatenmessmaschine in Kombination mit einem optischen Rundheitsmessgerät bestimmt. Präzisionskugeln werden vollständig geprüft, während Kugeln normaler Güte einer Stichprobenprüfung mit hohem Anteil unterzogen werden.

Die Erkennung interner Defekte ist von höchster Wichtigkeit. Alle Kugeln in medizinischer, luft- und raumfahrttechnischer und nuklearer Schutzklasse müssen einer zerstörungsfreien Prüfung mittels industrieller Computertomographie (CT) oder Hochenergie-Röntgenprüfung unterzogen werden. Jegliche Löcher, Risse oder Einschlüsse, die die zulässigen Abmessungen überschreiten, führen zur Aussortierung der gesamten Charge. Kugeln in Standardqualität werden mittels einer Kombination aus Wirbelstromprüfung und Ultraschallresonanz geprüft, wodurch ein effizientes Screening großer Mengen ermöglicht wird. Alle Prüfdaten werden in Echtzeit in die Cloud hochgeladen und bilden so eine lückenlose Rückverfolgbarkeitskette mit Rohmaterialchargen, Pressprotokollen und Sinterofenchargen.

Nur Kugeln, die alle oben genannten Tests bestehen, werden vakuumverpackt, mit einem Konformitätszertifikat und einem eindeutigen QR-Code versehen und offiziell ins Fertigwarenlager eingelagert. Dieses strenge System zur Prüfung der Stabilität nach dem Sintern gewährleistet, dass jede an unsere Kunden gelieferte Wolframlegierungskugel selbst härtesten Einsatzbedingungen und strengsten Wareneingangskontrollen standhält. So wird ein langfristig stabiler Ruf und hohes Marktvertrauen für führende Marken der Branche aufgebaut.

#### 4.6 Qualitätsprüfung von Wolframlegierungskugeln

Die Qualitätskontrolle begleitet den gesamten Produktionsprozess von Wolframlegierungskugeln, die Endproduktprüfung stellt jedoch den entscheidenden Nachweis für Prozessstabilität und Produktzuverlässigkeit dar. Basierend auf einem objektiven und quantifizierbaren Indikatorensystem werden physikalische, chemische, zerstörungsfreie und zerstörende Prüfverfahren umfassend eingesetzt,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



um sicherzustellen, dass jede Charge von Kugeln, die das Werk verlässt, die Anforderungen der technischen Vereinbarung erfüllt oder übertrifft.

#### 4.6.1 Dichteproofung von Wolframlegierungskugeln

Die wichtigste und intuitivste Leistungskennzahl für Wolframlegierungskugeln ist die Dichte. Sie ist auch der Parameter, auf den Kunden bei der Abnahmeprüfung als Erstes achten. Die Prüfung muss an der gesamten Charge durchgeführt werden, wobei alle Proben geprüft werden und keine Beanstandungen vorliegen dürfen. So wird vollständig ausgeschlossen, dass Kugeln mit geringer Dichte in hochwertige Anwendungen gelangen.

Das gängigste Verfahren basiert auf dem Archimedisches Verdrängungsprinzip. Die Kugel wird zunächst getrocknet und auf einer hochpräzisen Analysenwaage gewogen. Anschließend wird sie in reines Wasser oder wasserfreies Ethanol getaucht, um ihren Auftrieb zu messen. Das System berechnet und eliminiert automatisch Ausreißer. Um Messfehler durch Oberflächenporen oder Öffnungen zu vermeiden, werden Präzisionskugeln zusätzlich mit Paraffinwachs oder niedrigschmelzenden Legierungen vakuumimprägniert. Führende Hersteller haben automatisierte Dichtemessstationen in ihre Fertigungslinien integriert. Ein Roboterarm führt die Kugeln nacheinander in ein Wasserbad mit konstanter Temperatur, und die Messwerte der Waage werden in Echtzeit übertragen. Kugeln, die die oberen und unteren Grenzwerte überschreiten, werden pneumatisch in einen Abfallbehälter aussortiert. Der gesamte Prozess läuft vollautomatisch ab.

Ergänzend werden Ultraschall-Densitometer und industrielle CT-Stereodichteanalyse für hochwertige Kugeln in der Medizin- und Luftfahrtindustrie eingesetzt. Ultraschall-Densitometer ermitteln die Dichte aus Schallgeschwindigkeit und -dämpfung, während die industrielle CT die innere Porenverteilung dreidimensional rekonstruiert und die tatsächliche Dichte berechnet. Die Kombination dieser drei Methoden bildet ein pyramidenförmiges Dichteproofsystem: Die Wasserverdrängungsmethode deckt alle Proben ab, die Ultraschallprüfung ermöglicht eine schnelle Probenahme, und die CT dient der Klärung von Unstimmigkeiten und der Prozessoptimierung. Dieses mehrschichtige Dichteproofsystem mit minimalen Toleranzen gewährleistet, dass Wolframlegierungskugeln in Gegengewichts-, Abschirmungs- und Trägheitsanwendungen stets zuverlässigste und vorhersagbarste Leistung erbringen.

#### 4.6.2 Prüfung der Maßgenauigkeit von Wolframlegierungskugeln

Maßgenauigkeit und Morphologie entscheiden unmittelbar darüber, ob Wolframlegierungskugeln erfolgreich montiert werden können und ihre vorgesehene Funktion erfüllen, insbesondere da medizinische Kollimatoren und Präzisionslager nahezu keine Toleranz gegenüber geometrischen Fehlern aufweisen. Die Prüfmethoden haben sich von traditionellen Mikrometern zu vollautomatisierten optischen und kontaktbasierten Verbundmessungen weiterentwickelt.

Standardkugeln werden mithilfe einer automatischen Walzensortiermaschine mit hohem Durchsatz sortiert. Die Kugeln rollen entlang einer präzisen V-Nut, und Laser- oder induktive Sensoren erfassen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durchmesser- und Rundheitsabweichungen in Echtzeit. Qualifizierte Kugeln fallen automatisch entsprechend ihrer Größe in verschiedene Behälter, was eine extrem hohe Effizienz ermöglicht. Präzisionskugeln und höherwertige Kugeln gelangen in einen temperaturkontrollierten Reinraum, wo eine hochpräzise Koordinatenmessmaschine oder ein spezielles Rundheitsmessgerät jede Kugel in ihrer vollen Größe vermessen wird. Der Messkopf fährt mit extrem geringem Druck entlang mehrerer Mantellinien und eines Großkreises über die Kugeloberfläche und erfasst dabei Hunderttausende von Punktwolken-Datenpunkten. Anschließend werden diese Daten von einer Software in Echtzeit ausgewertet, um die tatsächliche Sphärizität, Rundheit und Oberflächenwelligkeit zu bestimmen.

Die modernsten medizinischen Kollimatorkugeln nutzen sogar eine kombinierte Weißlichtinterferometrie und Röntgenmikro-Computertomographie (Mikro-CT). Erstere erfasst die Oberflächenmikromorphologie, während letztere die Dicke der darunterliegenden, durch die Bearbeitung entstandenen Schadensschicht aufdeckt. So wird sichergestellt, dass die Kugel aufgrund minimaler geometrischer Abweichungen im Röntgenstrahlkanal keine Dosis verliert. Alle Messgeräte werden regelmäßig auf nationale Normen zurückgeführt, und die Prüfberichte enthalten für jede Charge QR-Codes, die einen einfachen Zugriff auf die ursprüngliche Punktwolke und die angepassten Kurven ermöglichen. Dieses umfassende System zur Dimensionsprüfung, von der schnellen Sortierung großer Chargen bis zur hochpräzisen Rückverfolgbarkeit einzelner Kugeln, gewährleistet die Austauschbarkeit und Zuverlässigkeit von Wolframlegierungskugeln selbst in anspruchsvollsten Montageumgebungen.

#### 4.6.3 Festigkeitsprüfung von Wolframlegierungskugeln

Die Festigkeitsprüfung kann aufgrund ihrer zerstörenden Natur nicht vollständig durchgeführt werden. Durch wissenschaftliche Probenahme und zerstörungsfreie Korrelationstechniken können wir jedoch die mechanischen Gesamteigenschaften der Charge effektiv kontrollieren und so sicherstellen, dass die von den Kunden erhaltenen Kugeln eine ausreichende Beständigkeit gegen Druck, Stöße und Ermüdung aufweisen.

Die routinemäßige Probenahme erfolgt mit automatisierten Rockwell- oder Vickers-Härteprüfgeräten. Der Eindringkörper hinterlässt eine deutliche Vertiefung am Äquator der Kugel, und das System liest und berechnet automatisch den Härtewert. Jede ungewöhnlich niedrige oder hohe Härte löst sofort eine erneute Chargenprüfung aus. Die Druckfestigkeitsprüfung wird mit einer speziellen Servopresse durchgeführt. Die Kugel wird zwischen zwei Hartmetallplatten platziert und schrittweise belastet, bis sie bricht. Die maximale Belastung und die Bruchform werden protokolliert. Die Schlagzähigkeitsprüfung erfolgt mit einem kleinen Fallhammer, der festhält, ob die Kugel beim Fallen aus einer definierten Höhe Risse oder Fragmente bildet.

Um den Anteil zerstörender Prüfverfahren zu reduzieren, hat die Industrie Ultraschallresonanz- und Wirbelstromphasenprüfverfahren weit verbreitet eingeführt, um eine Korrelationsdatenbank für Härte, Festigkeit und innere Defekte zu erstellen. Neue Chargen von Wolframlegierungskugeln erfordern nur minimale zerstörende Prüfungen, um ihre Gesamtfestigkeit zerstörungsfrei zu bestimmen. Kugeln in medizinischer Qualität und für hohe Trägheitsanwendungen werden zudem Wälzermüdungsprüfungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

unterzogen. Diese werden auf einer Wälzkontakt-Ermüdungsprüfmaschine durchgeführt, die reale Betriebsbedingungen über Millionen von Umdrehungen simuliert, um das Fehlen von Lochfraß oder Abplatzungen zu überprüfen. Alle Festigkeitsdaten korrespondieren eins zu eins mit Rohmaterialchargen, Sinterofenzyklen und Mahlchargen und bilden so eine vollständige Prozess-Leistungs-Kennlinie. Wird eine geringe Festigkeit festgestellt, kann diese schnell auf den spezifischen Prozess zurückgeführt werden, um gezielte Verbesserungen vorzunehmen. Dieses dreidimensionale Festigkeitsprüfsystem – eine Kombination aus stichprobenartiger zerstörender Prüfung, zerstörungsfreier Korrelation und Ermüdungsprüfung – maximiert die Ausbeute und bietet die robusteste mechanische Garantie für den sicheren Einsatz von Wolframlegierungskugeln unter hoher Belastung, hohen Geschwindigkeiten und langer Lebensdauer.

#### 4.6.4 Härteprüfung von Wolframlegierungskugeln

Die Härte ist der direkteste Indikator für die Verschleißfestigkeit, Verformungsbeständigkeit und die allgemeinen mechanischen Eigenschaften von Wolframlegierungskugeln. Das Prüfverfahren hat sich von der traditionellen manuellen Eindringprüfung zu einem Präzisionssystem weiterentwickelt, das vollautomatisierte Prüfverfahren mit zerstörungsfreier Prüfung kombiniert.

Für Kugeln in Standard- und Gegengewichtsqualität wird ein automatisierter Rockwell-Härteprüfer mit hohem Durchsatz eingesetzt. Ein Roboterarm führt jede Kugel in eine Positioniervorrichtung ein, und der Eindringkörper erzeugt mit einer definierten Last einen standardisierten Eindruck in der Äquatorialebene. Eine Kamera erfasst automatisch den Eindruckdurchmesser und berechnet den Härtewert in Echtzeit. Der gesamte Prozess kann Dutzende von Kugeln pro Minute bearbeiten. Für Präzisionskugeln und Kugeln in medizinischer Qualität kommt ein Mikro-Vickers -Härteprüfer zum Einsatz, der mit einer geringeren Last arbeitet und einen kleineren Eindruck erzeugt, wodurch sichtbare Beschädigungen der Kugeloberfläche vermieden werden. Gleichzeitig sorgt ein Bildmesssystem für eine Genauigkeit im Submikrometerbereich.

Um den Einfluss von Eindrücken auf hochwertige Kugeln vollständig zu eliminieren, setzen führende Unternehmen verstärkt auf Ultraschall-Kontaktimpedanzmessungen und laserinduzierte akustische Härteprüfgeräte. Diese zerstörungsfreien Prüfverfahren nutzen die Reflexionseigenschaften hochfrequenter Schallwellen an der Kugeloberfläche, um die Härteverteilung zu ermitteln. So ermöglichen sie eine vollständige Prüfung und erstellen eine Härteverteilungskarte der gesamten Kugel, wodurch lokale weiche Stellen oder ungewöhnliche Härtegradienten erkannt werden. Alle Härte Daten werden in Echtzeit in das Qualitätsmanagementsystem hochgeladen und automatisch mit den Schleifchargen und Wärmebehandlungsprotokollen verknüpft. Jede systematische Abweichung löst umgehend Prozessanpassungen im geschlossenen Regelkreis aus. Diese Weiterentwicklung der Härteprüfung von der zerstörenden Probenahme zur zerstörungsfreien Vollprüfung gewährleistet, dass Wolframlegierungskugeln auch in Anwendungen mit extrem hohen Anforderungen an die Oberflächenintegrität, wie z. B. Lager, Vibrationssiebe und medizinische Kollimatoren, eine zuverlässige und gleichbleibende Härte erreichen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.6.5 Prüfung der Schirmdämpfungseigenschaften von Wolframlegierungskugeln

Die Prüfung der Abschirmleistung ist ein einzigartiger und aussagekräftiger Indikator für Wolframlegierungskugeln in medizinischer und nukleartechnischer Qualität und steht in direktem Zusammenhang mit der Patientensicherheit und der Einhaltung der Gerätevorschriften. Die Prüfung gliedert sich in zwei Hauptkategorien: die Abschirmleistung gegenüber Gammastrahlen und die Abschirmleistung gegenüber Neutronen. Beide Prüfungen werden in einem professionellen Strahlungsmesslabor durchgeführt.

Die Abschirmleistung gegen Gammastrahlung wird typischerweise mit einem schmalen Strahl und optimaler Geometrie erzielt: Eine Standard- Punktquelle aus Kobalt-60 oder Cäsium-137 wird hinter dem Kollimator platziert, und eine Kugel aus Wolframlegierung wird entsprechend der Kollimatoranordnung in einer speziellen Halterung innerhalb einer Bleikammer fixiert. Ein hochreiner Germaniumdetektor befindet sich hinter der Kugel, um die transmittierten Strahlen zu empfangen. Das System erfasst automatisch die Zählrate mit und ohne Kugel, berechnet den linearen Schwächungskoeffizienten und die Halbwertschichtdicke und vergleicht diese Werte mit theoretischen Berechnungen. Medizinische Kollimatorkugeln erfordern zudem eine praktische Bildverifizierung. Die Kugel wird in ein reales Kollimatormodul eingebaut, und das Auflösungsziel sowie die Dosisverteilung werden unter einem medizinischen Linearbeschleuniger abgebildet, um sicherzustellen, dass die Fokussierschärfe und die Streustrahlung den IEC- und nationalen Normen entsprechen.

Die Neutronenabschirmleistung wird an bor-, gadolinium- und anderen modifizierten Kugeln geprüft . Ein Neutronengenerator oder eine Americium-Beryllium-Neutronenquelle wird in Kombination mit einem BF<sub>3</sub>-Proportionalzähler oder einem Helium-3-Detektor verwendet, um den Abfall der schnellen und thermischen Neutronenflüsse zu messen. Die Kugeln befinden sich in einem standardisierten abgeschirmten Behälter, und das System zeichnet die Abklingkurven der Neutronenflussrate bei verschiedenen Schichtdicken auf, um zu überprüfen, ob die geplante Abschirmwirkung erreicht wurde. Alle Tests werden in einem gut abgeschirmten Untergrundlabor mit extrem niedrigem Hintergrund durchgeführt. Die Quellstärke und der Detektor werden regelmäßig kalibriert, um die Rückführbarkeit der Ergebnisse auf nationale Standards zu gewährleisten.

Nach der Prüfung wird jeder Charge von Kugeln ein unabhängiger, CNAS-akkreditierter Bericht zur Abschirmleistung beigelegt. Ein QR-Code ermöglicht den Zugriff auf das Originalspektrum und die Berechnungsmethode. Dieses strenge Prüfsystem zur Abschirmleistung bietet die maßgebliche und glaubwürdigste wissenschaftliche Bestätigung für die sichere Anwendung von Wolframlegierungskugeln in der Tumorthherapie, der industriellen Fehlererkennung und in Isotopenbehältern.

#### 4.7 Standardsystem für Wolframlegierungskugeln

Normen für Wolframlegierungskugeln bilden eine Pyramidenstruktur mit internationalen Standards als Rahmen, nationalen/industriellen Standards als Hauptbestandteil und unternehmensinternen Standards als Ergänzung. Sie decken die gesamte Wertschöpfungskette ab, einschließlich Zusammensetzung,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Leistung, Prüfmethode, Verpackung, Transport und Umweltschutzaufgaben, und gewährleisten so Konsistenz und Rückverfolgbarkeit im globalen Handel und in der Anwendung.

International gilt ASTM B777, „Standard Specification for Tungsten-based High-Density Alloys“, als maßgebliche und allgemein anerkannte technische Norm. Sie klassifiziert Wolframlegierungskugeln anhand von Dichte, magnetischen Eigenschaften und Hauptanwendungen in verschiedene Güteklassen und wird von nahezu allen europäischen und amerikanischen Kunden als technischer Anhang zu Verträgen betrachtet. ISO 9001 und ISO 13485 regeln die Qualitätsmanagementsysteme für Kugeln, die in allgemeinen Industrie- bzw. Medizingeräten eingesetzt werden.

Chinas Normensystem ist das umfassendste und am schnellsten aktualisierte. Die Normenreihe GB/T 34560 beschreibt detailliert die Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften, die Maßtoleranzen und die Prüfverfahren für Wolframlegierungskugeln. YY/T 1636, „Technische Anforderungen an medizinische Wolframlegierungs-Kollimatoren“, ist speziell für den medizinischen Bereich bestimmt, und HG/T 2077, „Technische Bedingungen für Wolframlegierungs-Angelsenken“, deckt die meisten zivilen Produkte ab. Im Hinblick auf Umwelt- und Sicherheitsstandards regeln GB/T 33357 (Schwermetallmigration in Wolframlegierungen), RoHS 2.0 und die REACH-SVHC-Liste gemeinsam toxische und gefährliche Stoffe und gewährleisten so die absolute Sicherheit der Kugeln in Konsumgütern und im medizinischen Bereich.

Führende Unternehmen entwickeln häufig strengere Unternehmensstandards auf Basis nationaler und ASTM-Normen, wie beispielsweise höhere untere Grenzwerte für die Dichte, einen höheren Anteil zerstörungsfreier Prüfverfahren und strengere Nachweise zur Abschirmleistung. Diese Standards werden dann als verbindliche Anhänge in die technischen Lieferverträge aufgenommen. Sie treiben häufig die Überarbeitung und Aktualisierung nationaler und branchenspezifischer Normen voran.

Die Verpackungs- und Transportstandards orientieren sich einheitlich an den Anforderungen der GB/T 3873 und UN38.3 für die Ausnahmeregelungen beim Transport gefährlicher Güter. Die Kugeln werden in verschiedenen Verpackungsarten verpackt, z. B. in Vakuumfläschchen, stickstoffgefüllten Kartons oder mit Trockenmittel versiegelten Beuteln, und mit UN-Zertifizierung versehen, um absolute Sicherheit beim See- und Lufttransport über lange Strecken zu gewährleisten.

Die kontinuierliche Verbesserung und strikte Umsetzung des gesamten Standardsystems gewährleisten, dass Wolframlegierungskugeln vom Rohmaterial bis zum fertigen Produkt und vom Labor bis zum Patientenbett einen kontrollierbaren, nachvollziehbaren und zuverlässigen Standardweg durchlaufen. Dies hat die solide institutionelle Grundlage dafür geschaffen, dass chinesische Wolframlegierungskugeln sich auf dem Weltmarkt Gehör verschaffen und hohes Vertrauen genießen.

#### 4.7.1 Chinesischer Nationalstandard (GB/T) für Wolframlegierungskugeln

China ist der weltweit größte Produzent und Verbraucher von Wolframlegierungskugeln und hat dementsprechend das weltweit vollständigste und detaillierteste nationale Normensystem geschaffen, das

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

im Grunde alles von allgemeinen industriellen Anwendungen bis hin zu speziellen zivilen Anwendungen abdeckt.

GB/T 34560, „Hochdichte Wolframlegierungen“, ist die grundlegende und zentrale Norm. Sie ist in mehrere Teile gegliedert, die die chemische Zusammensetzung, Dichteklassen, mechanischen Eigenschaften, Maßtoleranzen, Oberflächenqualität, Prüfverfahren und Abnahmeregeln festlegen. Die Norm klassifiziert Wolframlegierungskugeln anhand ihrer Dichte und ihres Magnetismus in verschiedene Klassen und deckt die gängigen Systeme W-Ni-Fe und W-Ni-Cu ab. Darüber hinaus berücksichtigt sie W-Cu und modifizierte Funktionslegierungen. GB/T 33357, „Bestimmung der Schwermetallmigration in Wolframlegierungsprodukten“, und GB/T 33358, „Technische Anforderungen an den Umweltschutz für Wolframlegierungsprodukte“, verhindern aus Sicht der Verbrauchersicherheit die Migration schädlicher Elemente wie Blei, Cadmium und Quecksilber.

Im zivilen Bereich ist die Norm HG/T 2077 „Technische Bedingungen für Angelbleie aus Wolframlegierung“ die repräsentativste. Sie legt Anforderungen an Aussehen, Dichte, Härte, Korrosionsbeständigkeit und Verpackung fest und ist für alle nach Europa und Amerika exportierten Angelbleie verbindlich. Im medizinischen Bereich gelten die Normen YY/T 1636 „Technische Anforderungen an medizinische Kollimatoren aus Wolframlegierung“ und YY/T 1793 „Technische Bedingungen für medizinische Abschirmungskomponenten aus Wolframlegierung“. Diese stellen extrem hohe Anforderungen an nichtmagnetische Eigenschaften, Strahlungsdämpfung, Biokompatibilität und Sterilisierbarkeit. Die wichtigsten Merkmale chinesischer nationaler Normen sind ihre schnelle Aktualisierung, ihre umfassende Abdeckung und ihre hohe Durchsetzungskraft. Überarbeitungen werden nahezu jährlich veröffentlicht, um sicherzustellen, dass sie mit den neuesten technologischen Entwicklungen und Umweltauflagen Schritt halten.

#### 4.7.2 Internationale Industrienormen für Wolframlegierungskugeln

weltweit am häufigsten zitierte und maßgebliche internationale Industriestandard für Wolframlegierungskugeln und wird von Kunden in Europa, Amerika, Südostasien und dem Nahen Osten als technische Standardgrundlage angesehen.

Die Norm klassifiziert Wolframlegierungen in vier Dichteklassen (Klasse 1 bis 4), die unterschiedlichen Nickel-Eisen- und Nickel-Kupfer-Verhältnissen entsprechen. Sie legt außerdem die Mindestdichte, Zugfestigkeit, Dehnung, Härte und die Obergrenze der magnetischen Eigenschaften für jede Klasse fest. Der Anhang enthält empfohlene Prüfmethode und Stichprobenpläne. Die ASTM F3055, „Technische Spezifikation für die additive Fertigung von hochdichten Wolframlegierungen“, ist eine neuere Ergänzung und bietet einen Rahmen für den zukünftigen 3D-Druck von Wolframlegierungskugeln.

ISO 9001 und IATF 16949 sind als Qualitätsmanagementnormen für alle führenden Hersteller von Wolframlegierungskugeln verpflichtend; ISO 13485 wird speziell für die Produktion von Kugeln in Medizinproduktqualität verwendet. AMS 7725E, „Hochdichte Wolframlegierungen“, ursprünglich eine Spezifikation für Werkstoffe der Luft- und Raumfahrt, wird aufgrund seiner strengen Anforderungen an die Leistungskonstanz auch von vielen anspruchsvollen Industriekunden direkt herangezogen. Diese

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

internationalen Industrienormen, die sich durch ihre Einfachheit, Universalität und leichte Anwendbarkeit auszeichnen, haben sich zur am weitesten verbreiteten technischen Sprache in der globalen Lieferkette entwickelt.

#### 4.7.3 Normen für Wolframlegierungsfragmente in Europa, Amerika, Japan und Südkorea

Da Wolframlegierungskugeln keine spezifische zivile Anwendung zur Herstellung von Splittern haben, haben Industrieländer wie die USA, Europa, Japan und Südkorea keine spezifischen Normen für die Splitterherstellung aus Wolframlegierungskugeln entwickelt. Sämtliche technischen Anforderungen an vorgeformte Splitter aus Wolframlegierungen sind in den jeweiligen nationalen Militärspezifikationen oder internen Unternehmensstandards enthalten und unterliegen strenger Vertraulichkeit. Sie werden nicht veröffentlicht und sind nicht in das zivile Normensystem aufgenommen.

Öffentlich zugängliche Informationen umfassen lediglich einige Umwelt- und Sicherheitsvorschriften, wie beispielsweise Artikel 63 von Anhang XVII der EU-REACH-Verordnung. Dieser schreibt den Ersatz von Blei vor und fördert indirekt den Einsatz von Wolframlegierungen in zivilen Anwendungen mit hoher Dichte. Die US-Umweltschutzbehörde (EPA) empfiehlt in ihrer „Richtlinie zu alternativen Materialien für Bleiangelsenken“ ausdrücklich die Verwendung von Wolframlegierungen. Obwohl die japanische Norm JIS Z 2248 „Metallische Werkstoffe – Schlagprüfverfahren“ zur Bestimmung der Zähigkeit von Wolframlegierungen herangezogen werden kann, geht sie nicht explizit auf das Fragmentierungsverhalten ein. Der zivile Markt basiert ausschließlich auf Dichte, Härte, Korrosionsbeständigkeit und Umweltschutzindikatoren. Beschreibungen zum Thema „Fragmentierung“ werden in öffentlich zugänglichen Normen daher bewusst vermieden.

#### 4.7.4 Branchenspezifische Normen für Wolframlegierungskugeln

Zusätzlich zu nationalen und internationalen Standards haben wichtige Anwendungsbranchen auch detailliertere und strengere Fachnormen entwickelt, die eine wichtige Ergänzung zu den nationalen Normen und den ASTM-Normen darstellen.

In der Medizinbranche: Die US-amerikanische FDA 21 CFR Part 820 „Medical Device Quality Management System“ und die EU-MDR (EU) 2017/745 Anhang I stellen zusätzliche Anforderungen an die Biokompatibilität, Sterilität und Strahlenleistung von Kollimatoren und Abschirmungskomponenten aus Wolframlegierung; die „Technical Review Guidelines for the Registration of Customized Medical Devices“ der chinesischen CFDA führen Wolframlegierungskugeln als wichtigen Rohstoff auf.

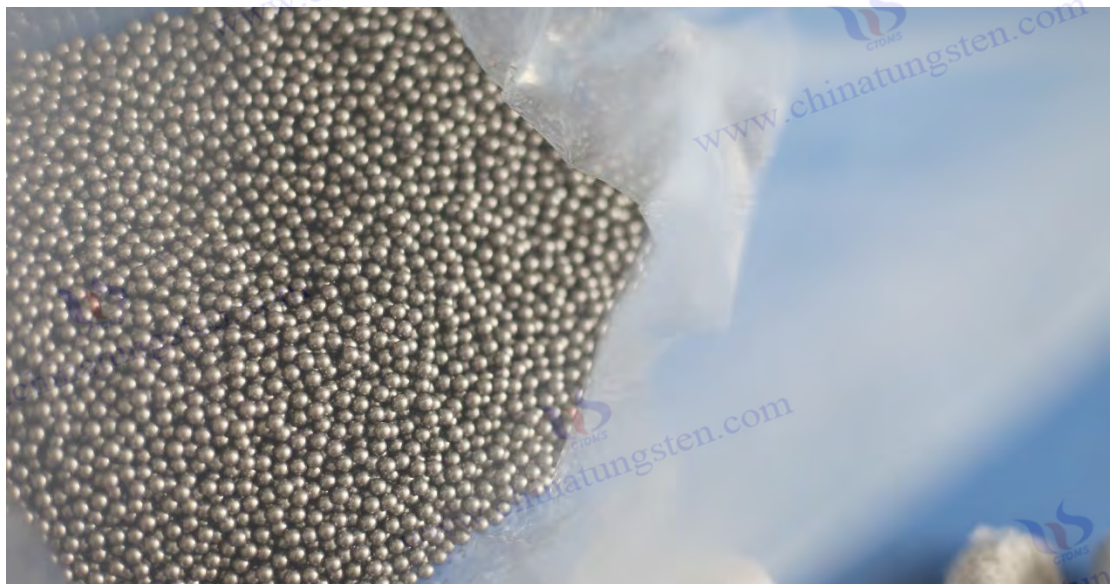
Die umweltfreundliche Angelbleiindustrie zeichnet sich durch das Non-Toxic Fishing Sink Certification Program des US Fish and Wildlife Service (USFWS), die Lead-Free Fishing Sink Technical Guidelines von Environment Canada und die Environmental Certification der Europäischen Union ECHA für Wolframlegierungs-Angelbleie aus, die zusammen die weltweit strengsten zivilen Umweltstandards darstellen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

In der Uhren- und Luxusgüterindustrie stellen die Schweizer Norm NIHS 93-10 „Technische Spezifikation für hochdichte Rotormaterialien“ und die deutsche Norm DIN 8308 „Ersatzmaterialien für Schwermetalle in Uhren“ nahezu strenge Anforderungen an Dichtekonstanz, Magnetismus, Oberflächenbehandlung und Langzeitstabilität.

In der Industrie für Lager und verschleißfeste Teile: Die chinesische Norm JB/T 12778 „Technische Bedingungen für verschleißfeste Kugeln aus hochdichten Legierungen“ und die ISO 683-17 „Technische Anforderungen an Kugeln aus Speziallegierungen für Lager“ legen Härte, Dauerfestigkeit und Dimensionsstabilität klar fest.

Diese branchenspezifischen Normen sind oft detaillierter, strenger und werden häufiger aktualisiert als nationale Normen. Sie gehören zu den am häufigsten zitierten verbindlichen Klauseln in Ausschreibungsunterlagen und technischen Vereinbarungen anspruchsvoller Kunden. Dieses fortschrittliche und sich ergänzende Normensystem hat gemeinsam den höchsten globalen Qualitätsstandard und die zuverlässigste Reputation für Wolframlegierungskugeln – vom Rohmaterial bis zur Anwendung – geschaffen.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungskugeln

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



## CTIA GROUP LTD

### 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

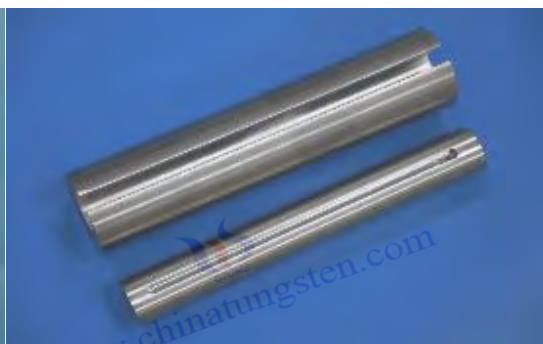
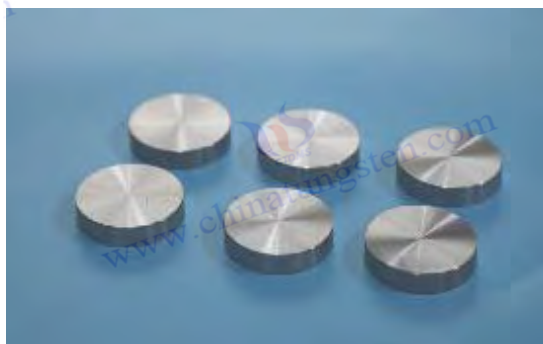
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 Anwendungsgebiete von Wolframlegierungskugeln

### 5.1 Anwendung von Wolframlegierungskugeln in allgemeinen Gegengewichten

Wolframlegierungskugeln Wolframlegierungen haben Blei, Stahl und Beton im Bereich der allgemeinen Gegengewichte ersetzt und sich als bevorzugtes Material für Miniaturisierung, Präzision und Umweltfreundlichkeit etabliert. Ihre Kombination aus hoher Dichte, Ungiftigkeit, Dimensionsstabilität und hervorragender Bearbeitbarkeit hat ihnen einen breiten Einsatz in verschiedenen zivilen Anwendungen ermöglicht, darunter Maschinenbau, Sportartikel und Konsumgüter des täglichen Bedarfs. Dadurch behaupten sie ihre führende Marktposition bei Wolframlegierungskugeln.

#### 5.1.1 Gegengewichte aus Wolframlegierungskugeln für Baumaschinen

Baumaschinen stellen extrem hohe Anforderungen an Gegengewichte: Sie müssen ein ausreichend hohes Ausgleichsmoment liefern, platzsparend angeordnet sein und gleichzeitig die Zuverlässigkeitsanforderungen hinsichtlich Vibration, Stoß und Langzeiteinsatz im Freien erfüllen. Wolframlegierungskugeln erfüllen diese Anforderungen optimal und sind daher ein unverzichtbarer Bestandteil von Gegengewichten für Turmdrehkrane, Bagger, Radlader, Betonpumpenwagen, Brückenbaumaschinen und Hafenkrane.

Bei Turmdrehkranen werden Wolframlegierungskugeln dicht im Gegengewichtskasten oder in gegossenen Gegengewichtsblöcken am hinteren Ende des Gegengewichtsauslegers angeordnet. Dadurch wird die Länge des Auslegers deutlich reduziert, während die Tragfähigkeit erhalten bleibt. Dies verringert die Windlast und den Stahlverbrauch. Bei Baggern und Ladem werden Wolframlegierungskugeln häufig als modulare Gegengewichtsblöcke am Heck des Fahrzeugs eingesetzt. Dies ermöglicht eine schnelle Anpassung des Arbeitsradius und ein flexibleres Lenk- und Transportverhalten auf engstem Raum. Betonpumpenwagen nutzen Wolframlegierungskugeln, um die Höhe des Fahrgestellgegengewichts zu reduzieren. Dadurch wird der Schwerpunkt des Fahrzeugs stabilisiert und die Kippsicherheit bei hohen Geschwindigkeiten und in unwegsamem Gelände deutlich verbessert.

Im Vergleich zu herkömmlichen Gegengewichten aus Gusseisen oder Beton sind Wolframlegierungskugeln nur etwa ein Drittel so groß, bieten aber das gleiche oder sogar ein höheres Ausgleichsmoment. Dadurch werden Stahl- und Transportkosten erheblich reduziert. Ihre absolute Ungiftigkeit und Witterungsbeständigkeit eliminieren zudem die Umweltbelastung und Gesundheitsrisiken, die mit Bleigewichten verbunden sind. Führende Baumaschinenhersteller weltweit setzen sie daher standardmäßig ein.

#### 5.1.2 Gegengewichte aus Wolframlegierungskugeln für Sportgeräte

Im Bereich der Sportgeräte haben sich Wolframlegierungskugeln aufgrund ihres extrem hohen Volumen-Gewichts-Verhältnisses und ihrer präzisen Einstellbarkeit zu den Geheimtipps für verbesserte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wettkampfleistung und Trainingseffekte entwickelt. Hochwertige Ausrüstung wie Golfschläger, Tennisschläger, Badmintonschläger, Baseballschläger, Hockeyschläger und professionelle Angelruten verwenden fast ausnahmslos Wolframlegierungskugeln an Schlüsselpositionen, um den Schwerpunkt und die Schwunggewichtsverteilung zu optimieren.

Golfschlägerköpfe stellen die am weitesten verbreitete und ausgereifteste Anwendung von Wolframlegierungskugeln im Sport dar. Diese Kugeln werden präzise in die Unterseite, die Rückseite oder die Spitze des Schlägerkopfes eingelassen oder eingeschraubt, wodurch der Sweetspot vergrößert, das Drehmoment erhöht und die Fehlertoleranz deutlich verbessert wird. Führende Marken bieten sogar Schläger mit verstellbaren Gewichten an, sodass Spieler ihre Schläge durch Hinzufügen oder Entfernen von Wolframlegierungskugeln individuell anpassen können. Tennis- und Badmintonschläger verwenden Wolframlegierungskugeln an den Positionen 3 und 9 Uhr am Rahmen oder verstecken sie am unteren Ende des Griffs, um die Höhe des Sweetspots zu verringern und die Schlagstabilität sowie die Topspin-Kontrolle zu erhöhen.

Baseball- und Hockeyschläger nutzen Wolframlegierungskugeln zur Anpassung der Endbelastung, was zu höheren Schwunggeschwindigkeiten und konzentrierter Schlagkraft führt. Professionelle Angelruten verwenden Wolframlegierungskugeln in den Ringen oder im Griff, um den Balancepunkt der Rute präzise einzustellen und so die Ermüdung bei längeren Wurfsessions zu reduzieren. All diese Anwendungen profitieren von der präzisen Bearbeitbarkeit der Wolframlegierungskugeln in jeder gewünschten Größe, ihrer Ungiftigkeit und ihrer Rostfreiheit. Dadurch lassen sie sich nahtlos in hochwertige Verbundwerkstoffsysteme wie Kohlefaser und Titanlegierungen integrieren. Dies hat sich zu einem der wichtigsten Verkaufsargumente führender internationaler Sportmarken entwickelt, die auf „Technologie und Leistung“ setzen.

### 5.1.3 Wolframlegierungskugeln für zivile Zwecke (Angelbleie, Modellgegengewichte)

Die bekanntesten und typischsten Anwendungen von Wolframlegierungskugeln im Alltag sind Angelbleie und Gegengewichte für verschiedene Modellbausätze. Dadurch können auch Laien auf intuitive Weise den Zauber von „Konzentration ist alles“ erleben.

weltweit meistverkaufte Einzelprodukt für Endverbraucher, hergestellt aus Wolframlegierungskugeln. Im Vergleich zu herkömmlichen Bleigewichten sind Wolframlegierungs-Angelgewichte nur ein Drittel bis die Hälfte so groß, wiegen aber genauso viel oder sogar mehr. Dadurch sinken die Köder schneller und mit weniger Wasserwiderstand zum Grund, was die Verluste durch Hänger deutlich reduziert. Ihre höhere Härte macht sie weniger anfällig für Verformungen durch Steine, Muscheln oder Wasserpflanzen, was ihre Lebensdauer erheblich verlängert. Mit farbigen Harz- oder Titanlegierungsbeschichtungen sind sie sowohl ästhetisch ansprechend als auch umweltfreundlich und erfüllen die strengsten bleifreien Vorschriften in Europa und Amerika. Das macht sie zur ersten Wahl für Freizeit- und Wettkampfangler weltweit.

Das Feld der Gegengewichte für Modellbau umfasst ferngesteuerte Autos, Modellflugzeuge,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Modellschiffe, Architekturmodelle und hochwertiges Spielzeug. Wolframlegierungskugeln werden in Chassis, Flugzeugnasen oder Schiffskiern verborgen, wodurch die Modelle einen niedrigeren Schwerpunkt und realistischere Fahrdynamik erreichen, ohne ihre Form zu verändern. Auch magnetisches Kinderspielzeug und Baustein-Balance-Sets verwenden zunehmend beschichtete Wolframlegierungskugeln als unsichtbare Gegengewichte, was die Sicherheit erhöht und gleichzeitig den Spielspaß steigert. Die automatischen Rotoren in mechanischen Luxusuhren stellen die hochwertigste zivile Anwendung von Wolframlegierungskugeln dar. Rotoren aus Wolframlegierung mit 22-karätigen Gold- oder Platinrändern erzeugen ein enormes Trägheitsmoment bei extrem geringer Krümmung, was die Aufzugseffizienz deutlich verbessert und sie zur Standardausrüstung von Top-Marken wie Patek Philippe, Rolex und Omega gemacht hat. Von Angelgewichten bis hin zu mechanischen Uhren – Wolframlegierungskugeln haben die Wahrnehmung von Hightech-Materialien durch den Durchschnittsverbraucher grundlegend verändert und sind zum größten und zugänglichsten Einblick in die Wolframlegierungsindustrie für Privatkunden geworden.

#### 5.1.4 Ölbohrventile und Gegengewichtskugeln für Rohrleitungen

Die Anforderungen an Gegengewichtskugeln in Ölbohrventilen und Rohrleitungssystemen sind äußerst spezifisch: Sie müssen über lange Zeiträume in der Tiefe zuverlässig funktionieren, wo extreme Drücke, hohe Temperaturen, starke Korrosion und heftige Vibrationen herrschen. Gleichzeitig müssen sie eine Mindestgröße aufweisen, um die Strömungskanäle so wenig wie möglich zu beeinträchtigen. Kugeln aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer unübertroffenen Dichte, ihrer hervorragenden Korrosionsbeständigkeit und ihrer extrem hohen mechanischen Festigkeit als optimale Lösung für die Gegengewichtsausrichtung von Ventilen und Rohrleitungen in modernen Tiefbohrungen, Ultratiefbohrungen und Offshore-Bohrplattformen erwiesen.

In kritischen Ventilen wie Bohrlochsicherheitsventilen, Rückschlagventilen, Drosselventilen und Schlammgeneratorventilen werden Kugeln aus Wolframlegierung als Gegengewichte im Ventilkern oder als Ausgleichselemente für den Aktuator eingesetzt. Ihre extrem hohe Schüttdichte ermöglicht es den Ventilen, bei gleichen Außenabmessungen ein höheres Schließmoment oder eine schnellere Öffnungsgeschwindigkeit zu erreichen. Insbesondere unter hohen Druckdifferenzen gewährleisten sie ein schnelles Absperren oder Drosseln des Ventils und verhindern so katastrophale Unfälle wie Blowouts oder Schlammrückfluss. Kugeln aus Wolframlegierungen auf Kupfer- oder Nickel-Kupfer-Basis zeichnen sich durch ihre hervorragende Beständigkeit gegenüber Schwefelwasserstoff- und Kohlendioxidkorrosion aus und bewähren sich daher optimal in den rauen Umgebungen der Öl- und Gasindustrie mit sauren Gasen. Sie weisen nahezu keine Lochfraßkorrosion oder Wasserstoffversprödung auf ihrer Oberfläche auf und gewährleisten so eine zuverlässige Abdichtung über die gesamte Betriebsdauer des Ventils.

In Unterwasserpipelines und Bohrlochkopfsystemen werden Wolframlegierungskugeln häufig als schwere Gegengewichte in Hydraulikzylindern oder Ausgleichszylindern eingesetzt. Ihre hohe Dichte erzeugt auf engstem Raum ausreichend Anpressdruck, wodurch Ventile den hydrostatischen Druck des Meerwassers und den Auftrieb der Flüssigkeiten in der Pipeline überwinden und so ein schnelles

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Schließen und zuverlässiges Verriegeln ermöglichen. Im Vergleich zu herkömmlichen Gegengewichten aus Stahl oder Blei sind Wolframlegierungskugeln nur etwa ein Drittel so groß, erzielen aber die gleiche oder sogar eine größere Gegengewichtswirkung. Dadurch wird das gesamte Unterwasserproduktionssystem kompakter und leichter, was die Installation vom Schiff aus deutlich vereinfacht und die Risiken von Unterwasserarbeiten minimiert.

Bei Molchen und intelligenten Molchen für Fernleitungen in der Öl- und Gasindustrie dienen Wolframlegierungskugeln als zentrale Gegengewichtskomponenten. Sie gewährleisten eine stabile Lage des Molchs in stark strömenden Medien mit hohem Druck und hoher Geschwindigkeit und ermöglichen die präzise Reinigung und Inspektion der Rohrleitungswände. Dank ihrer Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit können die Molche wiederholt in Rohrleitungen mit Sand, Wachs oder korrosiven Medien eingesetzt werden, ohne dass ihre Leistungsfähigkeit beeinträchtigt wird.

Wolframlegierungskugeln in Ölbohrventilen und Gegengewichten für Rohrleitungen haben nicht nur die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Anlagen deutlich verbessert, sondern auch kontinuierliche Fortschritte im gesamten Öl- und Gasfördersystem in Richtung Tiefsee, ultratiefer Bohrungen und hoher Schwefelgehalte ermöglicht und sind damit zu einem unverzichtbaren Hochleistungswerkstoff in der modernen Erdöltechnik geworden.

## 5.2 Anwendungen von Wolframlegierungskugeln im Industrie- und Präzisionsmaschinenbau

Wolframlegierungskugeln haben sich im Industrie- und Präzisionsmaschinenbau von einfachen Gegengewichten zu hochpräzisen beweglichen Teilen, verschleißfesten Funktionsteilen und Kernkomponenten von High-End-Instrumenten weiterentwickelt. Ihre umfassenden Vorteile wie hohe Härte, ausgezeichnete Verschleißfestigkeit, Dimensionsstabilität und thermische Eigenschaften machen sie zunehmend wichtig für mechanische Systeme, die eine lange Lebensdauer, hohe Zuverlässigkeit und extreme Betriebsbedingungen erfordern.

### 5.2.1 Wolframlegierungskugeln für Präzisions-Trägheitsbauteile

An die Gleichmäßigkeit und Stabilität der Massenverteilung werden extrem hohe Anforderungen gestellt. Kugeln aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer extrem hohen Schüttdichte und ausgezeichneten Langzeit-Dimensionsstabilität zum bevorzugten Material für Schwungrad-Energiespeichersysteme, Präzisionszentrifugenrotoren, Schwingungsdämpfungsmassenblöcke für optische Plattformen und Auswuchtbauteile für High-End-Analysegeräte entwickelt.

In Labor-Ultrazentrifugen und industriellen Trennanlagen werden Wolframlegierungskugeln präzise in den Rotorrand oder den Innenraum eingebettet. Ihre hohe Dichte sorgt für ein großes Trägheitsmoment auf engstem Raum und ermöglicht so höhere Trennfaktoren und Wirkungsgrade bei kompakterer Bauform. Die Kugeloberfläche wird hochglanzpoliert und dynamisch ausgewuchtet, um jegliche Vibrationen während der Hochgeschwindigkeitsrotation zu verhindern und damit die Präzisionslager und die Probenintegrität zu schützen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

In Schwingungsisolationssystemen von High-End-Optikprüfplattformen und Laserinterferometern werden Wolframlegierungskugeln als Dämpfungsmassen in mehrstufigen Feder- oder Luftlagerstrukturen eingesetzt. Ihre hohe Dichte reduziert die Eigenfrequenz des Systems signifikant und verbessert so die Isolation von externen Schwingungen erheblich. Diese Dämpfungswirkung bestimmt direkt die endgültige Bearbeitungsgenauigkeit und Messwiederholbarkeit, insbesondere bei Nanobearbeitungsanlagen und Präzisionsmessgeräten. Wolframlegierungskugeln für präzise mechanische Trägheitskomponenten bestehen typischerweise aus einem nichtmagnetischen W-Ni-Cu-System oder einem hochreinen W-Ni-Fe-System mit DLC-Beschichtung oder Passivierungsbehandlung der Oberfläche, um Reibung und Sekundärschwingungen weiter zu reduzieren. Die Kugeln erreichen höchste Präzision, wobei die Chargenqualitätsabweichungen in einem extrem engen Bereich liegen. Dies gewährleistet einen einmaligen dynamischen Auswuchtvorgang nach der Systemmontage. Dieses extreme Streben nach Trägheit und Stabilität macht Wolframlegierungskugeln zu den unsichtbaren Säulen für die Bewegungssteuerung im Mikrometer- und sogar Nanometerbereich in modernen Präzisionsmaschinen.

### 5.2.2 Kugeln aus Wolframlegierung für Hochpräzisionslager

Wolframlegierungskugeln für Hochpräzisionslager stellen die Spitze der Wolframlegierungskugelanwendungen im Bereich der Tribologie dar. Ihre extrem hohe Härte, ausgezeichnete Verschleißfestigkeit und Dauerfestigkeit ermöglichen ihnen eine um ein Vielfaches höhere Lebensdauer als Wälzlagerstahl unter extremen Betriebsbedingungen, denen herkömmliche Stahlkugeln nicht standhalten.

In Pumpen für hochkorrosive Medien, Lagern in Tiefseeanlagen, Hochdruckpumpen zur Meerwasserentsalzung und Getrieben für chemische Mischbehälter bieten Kugeln aus Wolframlegierung dank ihrer Härte und chemischen Beständigkeit, die die von Wälzlagerstahl deutlich übertreffen, extrem niedrige Verschleißraten und hohe Lochfraßbeständigkeit. Sie gewährleisten langfristige Formstabilität und reibungsarmen Betrieb selbst in sandigen, sauren oder hochtemperierten Medien. Im Vergleich zu Keramikugeln vermeidet ihre moderate Zähigkeit das Risiko von Sprödbrüchen und erhöht so die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Lager unter Stoßbelastung.

Im Bereich der Vakuum- und Hochtemperaturlager bieten Kugeln aus Wolframlegierungen noch deutlichere Vorteile. Vakuumbeschichtungsanlagen, Transportsysteme für Halbleiterwafer und Laufbahnlager in Hochtemperaturöfen arbeiten ganzjährig in einer Vakuumumgebung mit Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius. Herkömmliche Stahlkugeln verschleßen aufgrund der Verdunstung des Schmierfetts schnell, während Kugeln aus Wolframlegierungen dank ihrer inhärenten Hochtemperaturhärte und ihres niedrigen Dampfdrucks selbst bei unzureichender Schmierung oder sogar Trockenreibung einen extrem geringen Verschleiß aufweisen und dadurch ihre Lebensdauer um ein Vielfaches verlängern.

Hochgeschwindigkeits-Dentalhandstücke und Präzisionsspindellager nutzen sphärische, spiegelglatte Oberflächen aus Wolframlegierung und extrem niedrige Reibungskoeffizienten, um Drehzahlen jenseits

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

herkömmlicher Grenzen bei gleichzeitig extrem niedrigem Geräusch- und Vibrationsniveau zu erreichen. Oberflächenbeschichtungen aus DLC oder MoS<sub>2</sub> verbessern zusätzlich die Selbstschmiereigenschaften, was zu minimalem Temperaturanstieg und extrem langer Lagerlebensdauer im Hochgeschwindigkeitsbetrieb führt.

Die Herstellung von Wolframlegierungskugeln für Hochpräzisionslager ist ein äußerst anspruchsvoller Prozess, der Dutzende von Qualitätskontrollen vom Rohmaterial bis zum fertigen Produkt erfordert. Kugelform, Oberflächenrauheit und Chargenkonsistenz erreichen branchenweit höchste Standards. Diese Kugeln sind nicht nur die Wälzkörper des Lagers, sondern auch die Grundlage für die Zuverlässigkeit des gesamten Systems und spielen eine immer wichtigere Rolle im Bestreben der modernen High-End-Fertigung nach langer Lebensdauer und Wartungsfreiheit.

### 5.2.3 Verschleißfeste Kugeln für Vibrationssiebe und Trennanlagen

Vibrationssiebe und Trennanlagen sind unverzichtbare Kernkomponenten in Branchen wie der Mineralaufbereitung, der Chemie-, Lebensmittel-, Pharma- und Baustoffindustrie. Ihre Siebkugeln sind den kombinierten Einflüssen von hochfrequenten Vibrationen, starken Stößen, abrasiver Erosion und korrosiven Medien direkt ausgesetzt, was zu extremen Betriebsbedingungen führt. Kugeln aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer deutlich höheren Härte, Verschleißfestigkeit, Schlagzähigkeit und chemischen Beständigkeit gegenüber herkömmlichen Stahl-, Gusseisen- oder Zirkonoxidkugeln als Standardmaterial für Siebkugeln in High-End-Vibrationssieben und Trennanlagen etabliert. Sie bieten unersetzliche Vorteile, insbesondere bei der Verarbeitung von hochharten Erzen, stark korrosiven Schlämmen oder bei Feintrennverfahren, die eine extrem geringe Umweltbelastung erfordern.

Wolframlegierungskugeln dienen sowohl als Mahlkörper als auch als Trennmittel: Im Siebkasten kollidieren die Kugeln unter hochfrequenter Vibration heftig mit dem Mahlgut, wodurch große Partikel zerkleinert und gleichzeitig durch die Zwischenräume zwischen den Kugeln eine Klassierung und Siebung erreicht wird. Ihre extrem hohe Härte sorgt dafür, dass die Kugeloberfläche nahezu keine plastische Verformung oder Lochfraß aufweist. Das Wolframpartikelgerüst widersteht effektiv der mikroschneidenden Wirkung des Schleifmittels, während die Zähigkeit der Bindemittelphase ein Brechen oder Abblättern der Kugeln bei wiederholten Stößen verhindert. Selbst bei der Verarbeitung ultraharter Materialien wie Korund, Siliciumcarbid und Quarzsand bleibt der Verschleiß von Wolframlegierungskugeln extrem gering, und ihre Lebensdauer ist oft um ein Vielfaches länger als die von hochwertigen geschmiedeten Stahlkugeln.

In Nasssieb- und korrosiven Schlammumgebungen weisen Wolframlegierungskugeln eine besonders hohe chemische Stabilität auf. Die Kugeln des W-Ni-Cu-Systems bilden auf ihrer Oberfläche auf natürliche Weise einen dichten Passivierungsfilm und sind daher äußerst beständig gegen Säuren, Laugen, Salznebel und Chloridionen. Sie sind praktisch frei von Korrosion und Auslaugungsverunreinigungen und gewährleisten so die Reinheit der gesiebten Produkte. Dies macht sie besonders geeignet für Prozesse mit extrem hohen Reinheitsanforderungen, wie z. B. die Trennung von Lebensmittelstärke, das Sieben von pharmazeutischen Zwischenprodukten und die Nasssortierung von Lithiumbatteriematerialien. Im

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Vergleich zu Keramikugeln besitzen Wolframlegierungskugeln eine höhere Dichte, was zu einer höheren kinetischen Energie beim Sieben und einer höheren Sortiereffizienz führt; im Vergleich zu Stahlkugeln vermeiden sie Eisenverunreinigungen und Korrosionsprobleme vollständig.

In der Praxis werden Vibrationssieb- und Kugeln häufig mit Kugeln unterschiedlicher Korngrößen befüllt, wobei Wolframlegierungskugeln den gesamten Korngrößenbereich von grob bis ultrafein abdecken. Kugeln mit großem Durchmesser dienen der Vorzerkleinerung, Kugeln mit mittlerem Durchmesser verbessern die Mahlung und Kugeln mit kleinem Durchmesser erhöhen die Klassiergenauigkeit. Führende Unternehmen bieten sogar Wolframlegierungskugeln mit mikrotexturierten Oberflächen oder Verbundbeschichtungen an, um den Reibungskoeffizienten zwischen den Kugeln und zwischen Kugeln und Siebplatte weiter zu reduzieren und dadurch Energieverbrauch und Geräuschentwicklung zu senken.

Der Einsatz von Wolframlegierungskugeln in Vibrationssieben und Trennanlagen hat nicht nur die Wechselintervalle der Siebmedien deutlich verlängert und die Wartungskosten durch Ausfallzeiten gesenkt, sondern auch die Siebgenauigkeit und Produktkonsistenz erheblich verbessert. Angesichts immer strengerer Umweltauflagen hat er zudem unzähligen Unternehmen geholfen, die Probleme der Eisenbelastung durch herkömmliche Stahlkugeln und die Sprödbrechproblematik von Keramikugeln vollständig zu beseitigen. Wolframlegierungskugeln zählen somit zu den Schlüsselmaterialien moderner, effizienter und umweltfreundlicher Trennverfahren.

#### 5.2.4 Kugelstrahlen von Wolframlegierungen für Spritz- und Oberflächenbehandlung

Das Kugelstrahlen mit Wolframlegierungen für Spritz- und Oberflächenbehandlungen ist die einzigartigste und technologisch fortschrittlichste Anwendung von Wolframlegierungskugeln im Bereich der Oberflächentechnik. Dank ihrer hohen Härte, Dichte und ausgezeichneten Dauerfestigkeit ermöglicht es durch den Aufprall mit hoher Geschwindigkeit auf die Substratoberfläche Reinigung, Festigkeitssteigerung, Verformung und Einbringung von Druckeigenspannungen. Es gilt als die ultimative Methode zur Kaltverfestigung.

Beim Kugelstrahlen von Oberflächen für Triebwerkschalen, Kurbelwellen, medizinische Implantate, Formhohlräume und Hochleistungsschneidwerkzeuge erzeugt Wolframlegierungskugeln aufgrund ihrer deutlich höheren kinetischen Energie und Härte im Vergleich zu Stahl- oder Keramikugeln tiefere plastische Verformungszonen und höhere Druckeigenspannungen an der Oberfläche. Dies führt zu einer erheblichen Steigerung der Dauerfestigkeit und der Beständigkeit gegen Spannungsrissskorrosion der Bauteile. Wolframlegierungskugeln sind nach dem Aufprall weniger bruch- und verformungsanfällig und können deutlich häufiger wiederverwendet werden als herkömmliche Strahlmittel, wodurch der Kugelverbrauch erheblich reduziert wird.

Bei Anwendungen des Kugelstrahlens, die höchste Reinheit erfordern, wie beispielsweise das Ausdünnen der Rückseite von Silizium-Halbleiterwafern, das Nanoskalieren medizinischer Titanlegierungsimplantate oder die Reinigung optischer Linsensubstrate, sind die nichtmagnetischen und eisenfreien Eigenschaften des Kugelstrahlens mit Wolframlegierungen besonders wertvoll. Es entfernt

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Oberflächenoxidschichten und Verunreinigungen, ohne magnetische oder Metallionenrückstände zu hinterlassen, und gewährleistet so die Sicherheit nachfolgender Beschichtungs- oder Implantationsoperationen. Das Kugelstrahlen mit Wolframlegierungen auf speziell polierten und passivierten Oberflächen kann sogar in Reinräumen eingesetzt werden und ist somit ein unverzichtbares Werkzeug für die Oberflächenbehandlung im High-End-Bereich.

Im Vorbehandlungsschritt des thermischen Spritzens wird die Oberfläche des Substrats durch Kugelstrahlen mit Wolframlegierung aufgeraut, um die Haftung der Beschichtung zu verbessern. Die hohe Härte des Materials führt zu einer gleichmäßigeren und tieferen Aufrauung ohne eingebettete Verunreinigungen. Dadurch eignet es sich für die Vorbehandlung von Titanlegierungen, Nickelbasis-Superlegierungen und Keramikbeschichtungen. Im Vergleich zu Aluminiumoxid- oder Stahlstrahlmitteln entstehen beim Kugelstrahlen mit Wolframlegierung nahezu keine Staubpartikel oder eingebetteten Partikel, was die nachfolgenden Reinigungsprozesse deutlich vereinfacht.

Angesichts der steigenden Anforderungen an die Lebensdauer von Triebwerkschaufeln, des Trends zu nanokristallinen Oberflächen bei medizinischen Implantaten und des Bedarfs an dünneren und leichteren 5G-Kommunikationskomponenten entwickelt sich das Kugelstrahlen von Wolframlegierungen hin zu kleineren Partikelgrößen, engeren Partikelgrößenverteilungen und Multifunktionalität. Einige High-End-Produkte wurden bereits mit Chrom- oder Nitrierbeschichtungen versehen, wodurch Verschleißfestigkeit und Antihafteigenschaften weiter verbessert wurden. Dank seiner unübertroffenen Festigkeitssteigerung, Reinheit und langen Lebensdauer hat sich das Kugelstrahlen von Wolframlegierungen zu einem der zuverlässigsten und fortschrittlichsten Strahlmittel in der modernen Oberflächentechnik entwickelt.

#### 5.2.5 Wolframlegierungskugel zur Kalibrierung von Messgeräten und Waagen

Wolframlegierungskugeln, die zur Kalibrierung von Messgeräten und Waagen verwendet werden, stellen die präziseste und anspruchsvollste Anwendung von Wolframlegierungskugeln im Bereich der Metrologie dar. Ihre Anforderungen an Dichtekonstanz, Langzeitstabilität und Umweltverträglichkeit sind auf höchstem Niveau, und sie gelten als unverzichtbarer Qualitätsmaßstab für nationale metrologische Normen und hochwertige Analysegeräte.

In nationalen Qualitätsprüflaboratorien, hochpräzisen Analysenwaagen und Präzisionsprüfgeräten müssen Wolframlegierungskugeln, die als Normalgewichte oder Kalibriermassenblöcke verwendet werden, eine extrem hohe Dichtehomogenität, Dimensionsstabilität und Oxidationsbeständigkeit aufweisen. Die Kugeln des nichtmagnetischen Systems W-Ni-Cu werden einem mehrstufigen Präzisionsschleifverfahren und einer Vakuumwärmebehandlung unterzogen, wodurch die Dichteabweichung in einem extrem engen Bereich gehalten wird. Die Oberflächenpassivierungsschicht gewährleistet eine vernachlässigbare Massenänderung nach jahrelanger Lagerung. Dank dieser Eigenschaften eignen sich Wolframlegierungskugeln als Normalgewichte der Güteklasse E1 oder sogar höher und sind direkt in die internationale Rückverfolgbarkeitskette für Kilogramm-Prototypen eingebunden. Sie bieten den zuverlässigsten Qualitätsmaßstab für den globalen Handel, die wissenschaftliche Forschung und die industrielle Messtechnik.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

In den internen Kalibriermechanismen von hochpräzisen Analysenwaagen und Mikrowaagen werden Wolframlegierungskugeln als eingebaute Normalmassen verwendet. Ihre extrem geringe Größe und extrem hohe Masse ermöglichen es der Waage, auf engstem Raum eine optimale Kombination aus großem Messbereich und hoher Auflösung zu erzielen. Die spiegelpolierte und vergoldete Oberfläche der Kugeln verhindert nicht nur Oxidation und Materialermüdung, sondern reduziert auch die Auswirkungen elektrostatischer Adsorption und des Luftauftriebs. Dadurch werden bei jeder Kalibrierung hochreproduzierbare Kalibrierergebnisse gewährleistet.

In Kraftsensoren, Materialprüfmaschinen und Drehmomentschlüssel-Kalibriergeräten werden Wolframlegierungskugeln häufig als Standard-Kraftmesskugeln oder Waagekugeln verwendet. Dank ihrer präzise bekannten Masse und perfekten Kugelform ermöglichen sie die Erzeugung reiner Gravitationslasten und vermeiden so die Exzentrizitätsfehler und Kontaktverformungen, die bei herkömmlichen Gewichtsstapelungen auftreten. Der extrem niedrige Ausdehnungskoeffizient und der fehlende Magnetismus der Wolframlegierungskugeln über einen weiten Bereich von Feuchtigkeits- und Temperaturbedingungen gewährleisten zudem die Langzeitstabilität des Kalibrierprozesses und seine Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen.

Moderne Labore haben zudem mit Platin oder Palladium beschichtete Wolframlegierungskugeln für Gasadsorptions- und Oberflächenwissenschaftsexperimente entwickelt. Ihre sauberen Oberflächen und ihre bekannte Masse machen sie zu idealen Trägern für die Untersuchung des molekularen Adsorptionsverhaltens. Dank ihrer unübertroffenen Dichtegenauigkeit, Dimensionsgenauigkeit und Umweltstabilität haben sich Wolframlegierungskugeln zum zuverlässigsten physikalischen Standard in der modernen Metrologie entwickelt – von makroskopischen Kraftwerten bis hin zu mikroskopischen Massen. Sie treiben die kontinuierliche Weiterentwicklung analytischer Instrumente hin zu höherer Auflösung und längerer Stabilität voran.

### 5.3 Anwendung von Wolframlegierungskugeln in High-End-Spezialbereichen

Wolframlegierungskugeln in hochspezialisierten Anwendungsbereichen stellen die ultimative Entfaltung ihres Leistungspotenzials dar. Diese Anwendungsgebiete stellen oft vielfältige und extreme Anforderungen an die Materialien: extrem hohe Dichte und Abschirmwirkung, nichtmagnetischer oder kontrollierbarer Magnetismus, höchste Präzision, Langzeitstabilität in der Strahlung sowie Biokompatibilität oder Reinheit. Durch Optimierung der Zusammensetzung und Verfeinerung der Prozesse erfüllen Wolframlegierungskugeln diese strengen Anforderungen perfekt und sind zu einer unverzichtbaren Kernkomponente in medizinischen Strahlentherapie- und nukleartechnischen Anlagen geworden.

#### Wolframlegierungskugeln für Kollimatoren in der medizinischen Strahlentherapie

Der Kollimator ist das Herzstück moderner Präzisionsgeräte zur Strahlentherapie von Tumoren. Seine Aufgabe ist es, den hochenergetischen Strahl so zu formen, dass die Dosisverteilung optimal an die dreidimensionale Kontur der Läsion angepasst ist und gleichzeitig die Strahlendosis für das umliegende

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gesunde Gewebe minimiert wird. Kugeln aus Wolframlegierung, als präzises und wichtigstes Füll- und Formelement des Kollimators, haben die Präzision und Sicherheit der Strahlentherapie durch ihre unübertroffene Strahlungsdämpfung, geometrische Präzision und nichtmagnetischen Eigenschaften revolutioniert.

In den Multilamellenkollimatorsystemen von Gamma Knife, CyberKnife und medizinischen Linearbeschleunigern sind Zehntausende von Wolframlegierungskugeln präzise zwischen den Lamellen oder in der Fokussierblende angeordnet und bilden so einen dynamisch variablen Strahlengang. Die vollständig nichtmagnetische Natur der Kugeln gewährleistet, dass in Umgebungen mit starken Magnetfeldern (wie z. B. bei der MR-Linac-gesteuerten Strahlentherapie) keine Interferenzartefakte entstehen. Gleichzeitig ermöglicht die extrem hohe Dichte des Kollimators eine extrem hohe Gammastrahlenblockierung bei extrem geringer Dicke. Dadurch wird die Hochdosiszone präzise auf das Tumervolumen begrenzt, während gesundes Gewebe nahezu unbeeinträchtigt bleibt. Dieser extrem präzise Dosisgradient erlaubt es Ärzten, Tumore an komplexen Lokalisationen wie Hirnstamm, Rückenmark oder Prostata radikal zu bestrahlen, ohne schwerwiegende Komplikationen befürchten zu müssen.

Wolframlegierungskugeln in Kollimatoren bilden deren fokussierende Füllstruktur. Herkömmliche Kollimatoren aus Platinlegierung oder Bleiblock sind sperrig und extrem schwer, während Wolframlegierungskugeln präzise gestapelt werden können, um ein Fokussierblendenarray mit beliebiger Krümmung zu bilden. Dadurch wird die gesamte Ausrüstung leichter und kompakter, was eine schnelle Rotation des Gantry und eine Echtzeit-Bildführung ermöglicht. Die Kugeloberfläche wird hochglanzpoliert und einer speziellen Passivierungsbehandlung unterzogen. Dies reduziert nicht nur die Sekundärelektronenemission, sondern auch die Röntgenstreuung erheblich und gewährleistet so die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Dosisberechnungen.

In passiven Streu- und Pencil-Beam-Scanning-Systemen für die Protonen- und Schwerionentherapie werden Wolframlegierungskugeln auch zur Füllung von Filtern oder Kompensatoren eingesetzt, um die Energieverteilung des Teilchenstrahls zu modulieren und eine präzise Überlagerung von Bragg-Peaks in tiefen Dosen zu erreichen. Ihre hohe Dichte und chemische Inertheit gewährleisten, dass unter hoher Teilchenflussdichte keine Aktivierungsprodukte entstehen oder Materialdegradation auftritt. Dies garantiert die Reinheit des Behandlungsraums und die Patientensicherheit.

Die ungiftigen, sterilisierbaren und langzeitformstabilen Eigenschaften von Wolframlegierungskugeln gewährleisten, dass sie die strengsten Anforderungen an Biokompatibilität und Strahlenverträglichkeit für Medizinprodukte erfüllen. Jede Kugelcharge muss vor dem klinischen Einsatz den ISO 10993-Bioassay und die FDA-Zulassung bestehen. Diese durchgängige Qualitätskontrolle, vom Rohmaterial bis zum fertigen Produkt, macht Wolframlegierungskugeln zum Eckpfeiler moderner Strahlentherapiegeräte. Sie erreichen Präzision im Millimeterbereich und Sicherheit im Mikrometerbereich und tragen so zu höheren Heilungsraten und weniger Nebenwirkungen für unzählige Krebspatienten bei. Ihre breite Anwendung in medizinischen Kollimatoren demonstriert nicht nur die Spitzentechnologie der Wolframlegierungskugeln, sondern unterstreicht auch den bedeutenden Beitrag

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Materialwissenschaft zur menschlichen Gesundheit.

### 5.3.2 Wolframlegierungskugeln zur Strahlungsabschirmung und Neutronenabsorption in der Kernindustrie

Wolframlegierungskugeln für die Strahlenabschirmung und Neutronenabsorption in der Nuklearindustrie stellen die anspruchsvollste und wichtigste Anwendung von Wolframlegierungskugeln in kerntechnischen Anlagen dar. Sie müssen eine effiziente und stabile Strahlungsdämpfung und Neutroneneinfang in hochintensiven Neutronen- und Gammastrahlungsfeldern, in stark korrosiven Kühlmitteln und unter langfristiger Hochtemperaturbestrahlung gewährleisten und dabei gleichzeitig ihre strukturelle Integrität und Dimensionsstabilität erhalten.

In den Abschirmungsstrukturen von Forschungsreaktoren, Reaktoren zur Produktion medizinischer Isotope und Anlagen zur Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen werden häufig Wolframlegierungskugeln verwendet, um mehrschichtige Abschirmwände, Behälterspaltens oder bewegliche Abschirmmodule zu füllen. Sie bilden eine Schutzschicht, die sowohl hochdicht als auch hochflexibel ist. Ihre extrem hohe Absorptionsfähigkeit für Gammastrahlen ermöglicht eine deutliche Reduzierung der Abschirmdicke und somit einen höheren Schutz auf engstem Raum. Durch den Einbau stark neutronenabsorbierender Elemente wie Bor, Gadolinium und Samarium weisen die Kugeln zudem hervorragende Wirkungsquerschnitte für den Einfang thermischer und schneller Neutronen auf und ermöglichen so eine umfassende Kontrolle gemischter Strahlungsfelder. Diese doppelte Abschirmwirkung ist besonders wertvoll für die Konstruktion von beengten Heißkammern, Handschuhkästen und Transportbehältern.

In Steuerstabantrieben von Reaktoren und Neutronenstrahl-Experimentieranlagen werden mit Absorbermaterial dotierte Wolframlegierungskugeln in Absorptionsringen oder Kollimationsfüllkomponenten eingesetzt, um die Neutronenflussverteilung zu regulieren und die damit verbundenen Gammastrahlen abzuschirmen. Dies gewährleistet die Sicherheit des Versuchspersonals und der Anlagen. Dank ihrer Kugelform ergeben sich natürliche Packungseigenschaften, wodurch die Abschirmstruktur dicht, aber gleichzeitig leicht zu montieren und zu demontieren ist. Dies erleichtert die regelmäßige Wartung und minimiert die Abfallentsorgung. Kugeln aus Wolframlegierung ermöglichen den Betrieb über längere Zeiträume in Hochtemperatur-Schwerwasser- oder Salzschnmelzenumgebungen ohne signifikante Dimensionsänderungen oder Leistungseinbußen. Spezielle Oberflächenpassivierungs- oder Beschichtungsverfahren verbessern die Beständigkeit gegen Kühlmittelkorrosion und die Haftung von Aktivierungsprodukten zusätzlich und gewährleisten so die dauerhafte Schutzwirkung der Anlage über ihre gesamte geplante Lebensdauer von Jahrzehnten. Im Vergleich zu herkömmlichem boriiertem Stahl, Blei-Bor- Polyethylen oder Cadmiumpplatten bieten Wolframlegierungskugeln umfassende Vorteile hinsichtlich Dichte, Festigkeit, Temperaturbeständigkeit und Bearbeitbarkeit. Dadurch sind sie ein Schlüsselmaterial für die Kompaktheit, Langlebigkeit und Umweltfreundlichkeit von Kernkraftwerken der nächsten Generation. Ihre breite Anwendung verbessert nicht nur die Sicherheit und Betriebseffizienz kerntechnischer Anlagen erheblich, sondern bietet auch die zuverlässigste Materialgarantie für die nachhaltige Entwicklung der Radioisotopenproduktion, der Bor-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Neutroneneinfangtherapie und fortschrittlicher Kernenergiesysteme.

### 5.3.3 Wolframlegierungskugeln für die Luft- und Raumfahrt-Trägheitsnavigation und Schwungradanwendungen

Die extremen Anforderungen an die Massenverteilung in der Luft- und Raumfahrt-Trägheitsnavigation und in Schwungradsystemen machen Kugeln aus Wolframlegierungen zu den zentralen Trägheitskomponenten von Schwungradrotoren für Energiespeicher und Präzisionsgyroskopen. Ihre hohe Dichte und exzellenten dynamischen Auswuchteigenschaften ermöglichen ein hohes Trägheitsmoment auf kleinstem Raum und somit eine hochpräzise Lageregelung und Energiespeicherung für Satelliten, Sonden und Raumstationen.

In Schwungrädern für Satellitenenergiespeicher werden Wolframlegierungskugeln präzise in die Innenseite von Felgen aus Kohlefaser oder Titanlegierung eingebettet oder geklebt und bilden so hochdichte Massenringe. Ihre extrem hohe Schüttdichte erhöht das Trägheitsmoment des Schwungrads bei gleichem Außendurchmesser erheblich, was zu einer deutlich höheren Energiespeicherdichte als bei herkömmlichen Materialien führt. Dies ermöglicht eine schnelle Energieabgabe bei Spitzenlasten oder die Aufrechterhaltung des normalen Satellitenbetriebs während Schattenperioden. Die Kugeloberfläche wird hochglanzpoliert und mehrstufig dynamisch ausgewuchtet, um extrem geringe Vibrationen und Geräusche bei hohen Rotationsgeschwindigkeiten zu gewährleisten und Störungen empfindlicher optischer Nutzlasten oder Kommunikationssysteme zu vermeiden. Die Verwendung nichtmagnetischer oder mikromagnetischer Wolframlegierungskugeln eliminiert zudem Hystereseverluste und Magnetfeldstörungen, was zu einer höheren Effizienz des Schwungradsystems und einer längeren Lebensdauer führt.

In den Lageregelungs-Schwungradsystemen von Raumsonden und Raumstationen spielen Kugeln aus Wolframlegierung eine entscheidende Rolle. Auf ihren jahre- oder gar jahrzehntelangen Reisen sind die Sonden auf diese Schwungradsysteme angewiesen, um ihre Lage präzise anzupassen und so die Kommunikation zwischen Antenne und Erde oder die Ausrichtung der Solarpaneele zur Sonne aufrechtzuerhalten. Die hohe Dichte der Wolframlegierungskugeln ermöglicht es den Schwungrädern, innerhalb eines begrenzten Massenbudgets ausreichend Drehimpulsreserven bereitzustellen und damit die Anforderungen komplexer Bahnmanöver und Lageregelungen zu erfüllen. Ihre ausgezeichnete Strahlungsbeständigkeit und langfristige Dimensionsstabilität gewährleisten, dass es auch unter kosmischer Strahlung und drastischen Temperaturschwankungen nicht zu Leistungseinbußen oder geometrischen Verformungen kommt.

Hochwertige kommerzielle Satellitenkonstellationen und Kleinsatellitenplattformen reagieren sensibel auf Kosten und Größe. Der Einsatz von Wolframlegierungskugeln macht Schwungradsysteme leichter, kleiner und effizienter und treibt so die rasante Entwicklung der Satellitenminiaturisierung und kostengünstiger Vernetzung voran. Auch beim Auswuchten von Roboterarmen in Raumstationen und bei Schwingungsdämpfungssystemen für experimentelle Plattformen dienen Wolframlegierungskugeln als verstellbare Massenblöcke. Durch präzises Hinzufügen und Entfernen von Massen wird eine

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Feinabstimmung des Schwerpunkts und eine optimale Schwingungsdämpfung erreicht. Die breite Anwendung von Wolframlegierungskugeln in der Luft- und Raumfahrt, insbesondere in der Trägheitsnavigation und bei Schwungradsystemen, hat nicht nur die Manövrierfähigkeit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Raumfahrzeugen deutlich verbessert, sondern auch die robusteste Energieversorgung für die Erforschung des Weltraums, Satelliteninternet und Langzeitaufenthalte auf Raumstationen gewährleistet. In Form winziger Kugeln tragen sie den großen Traum der Menschheit von der Erforschung des Universums in sich und sind zu einem unverzichtbaren, oft unbesungenen Helden der modernen Luft- und Raumfahrttechnik geworden.

#### 5.3.4 Wolframlegierungskugeln zur Strahlungsabschirmung und Neutronenabsorption in der Kernindustrie

Wolframlegierungskugeln zur Strahlungsabschirmung und Neutronenabsorption in der Nuklearindustrie stellen die anspruchsvollste und kritischste Anwendung von Wolframlegierungskugeln in kerntechnischen Anlagen dar. Sie müssen eine effiziente und stabile Strahlungsdämpfung und Neutroneneinfang in Umgebungen mit hoher Neutronen- und Gammastrahlungsdichte, stark korrosiven Kühlmitteln und langfristiger Hochtemperaturbestrahlung gewährleisten und gleichzeitig ihre strukturelle Integrität und Dimensionsstabilität erhalten.

In den Abschirmungsstrukturen von Forschungsreaktoren, Reaktoren zur Produktion medizinischer Isotope und Anlagen zur Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen werden häufig Wolframlegierungskugeln verwendet, um mehrschichtige Abschirmwände, Behälterspaltenspalten oder bewegliche Abschirmmodule zu füllen. Sie bilden eine Schutzschicht, die sowohl hochdicht als auch hochflexibel ist. Ihre extrem hohe Absorptionsfähigkeit für Gammastrahlen ermöglicht eine deutliche Reduzierung der Abschirmdicke und somit einen höheren Schutz auf engstem Raum. Durch die Beimischung von Elementen mit hohen Einfangquerschnitten wie Bor, Gadolinium und Samarium weisen die Kugeln zusätzlich exzellente Einfangquerschnitte für thermische und schnelle Neutronen auf und ermöglichen so eine umfassende Kontrolle gemischter Strahlungsfelder. Diese doppelte Abschirmwirkung ist besonders wertvoll für die Konstruktion von beengten Heißkammern, Handschuhkästen und Transportbehältern.

In Steuerstabantrieben von Reaktoren und Neutronenstrahl-Experimentieranlagen werden mit Absorbermaterial dotierte Wolframlegierungskugeln in Absorptionsringen oder Kollimationsfüllkomponenten eingesetzt, um die Neutronenflussverteilung zu regulieren und die damit verbundenen Gammastrahlen abzuschirmen. Dies gewährleistet die Sicherheit des Versuchspersonals und der Anlagen. Dank ihrer Kugelform ergeben sich natürliche Packungseigenschaften, wodurch die Abschirmstruktur dicht, aber gleichzeitig leicht zu montieren und zu demontieren ist. Dies erleichtert die regelmäßige Wartung und minimiert die Abfallentsorgung.

Kugeln aus Wolframlegierung ermöglichen den Betrieb über längere Zeiträume in Hochtemperatur-Schwerwasser- oder Salzschnmelzenumgebungen ohne signifikante Dimensionsänderungen oder Leistungseinbußen. Spezielle Oberflächenpassivierungs- oder Beschichtungsverfahren verbessern die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beständigkeit gegen Kühlmittelkorrosion und die Haftung von Aktivierungsprodukten zusätzlich und gewährleisten so die dauerhafte Schutzwirkung der Anlage über ihre gesamte geplante Lebensdauer von Jahrzehnten.

Im Vergleich zu herkömmlichen borbeschichteten Stahl-, Blei-Bor- Polyethylen- oder Cadmiumpplatten bieten Wolframlegierungskugeln umfassende Vorteile hinsichtlich Dichte, Festigkeit, Temperaturbeständigkeit und Bearbeitbarkeit. Dadurch sind sie ein Schlüsselmaterial für die Kompaktheit, Langlebigkeit und Umweltfreundlichkeit von Kernkraftwerken der nächsten Generation. Ihre breite Anwendung verbessert nicht nur die Sicherheit und Betriebseffizienz kerntechnischer Anlagen erheblich, sondern bietet auch die zuverlässigste Materialgarantie für die nachhaltige Entwicklung der Radioisotopenproduktion, der Bor-Neutroneneinfangtherapie und fortschrittlicher Kernenergiesysteme. In ihrer Kugelform schützen Wolframlegierungskugeln unauffällig die vordersten Linien der Nuklearindustrie und sind somit ein unverzichtbarer Schutz für die friedliche Nutzung der Kernenergie.

### 5.3.5 Wolframlegierungskugeln für Schwungrad und Gyroskop der Satellitenlageregelung

Schwungräder und Gyroskopsysteme zur Lageregelung von Satelliten sind die zentralen Aktuatoren für Raumfahrzeuge, um eine präzise Ausrichtung und einen stabilen Flug zu gewährleisten. Wolframlegierungskugeln dienen als Trägheitsmassenelemente und bieten dank ihrer extrem hohen Dichte und hervorragenden dynamischen Auswuchteigenschaften maximale Rotationsmasse auf engstem Raum. Dadurch sind sie eine unverzichtbare, leistungsstarke Energiespeicher- und Steuerungskomponente für moderne Satellitenplattformen.

Die entscheidenden Faktoren für Lebensdauer und Manövrierfähigkeit im Orbit.

Im Steuermomentkreisel und Reaktionsschwungrad sind Wolframlegierungskugeln präzise in den Rand des Hochgeschwindigkeitsrotors eingelassen und bilden einen Massenring hoher Dichte. Dank seiner hohen Dichte erreicht der Rotor ein Trägheitsmoment, das das von herkömmlichen Materialien mit gleichem Außendurchmesser deutlich übertrifft. Dadurch werden bei geringerem Volumen und geringerer Masse eine höhere Speicherung und schnellere Entladung des Drehimpulses erzielt. Dies ist entscheidend für Anwendungen wie Erdbeobachtungssatelliten, die häufige Ausrichtungskorrekturen erfordern, Kommunikationssatelliten, die eine präzise Erdbeobachtung benötigen, und wissenschaftliche Satelliten, die extrem vibrationsarme Umgebungen erfordern. Die Oberfläche der Wolframlegierungskugeln wird hochglanzpoliert und mehrstufig dynamisch ausgewuchtet, um extrem geringe Vibrationen und Geräusche während der Hochgeschwindigkeitsrotation zu gewährleisten und Störungen empfindlicher Bordnutzlasten wie hochauflösender Kameras oder Laserkommunikationsterminals zu vermeiden.

Nichtmagnetische oder mikromagnetische Kugeln aus Wolframlegierung ermöglichen den sicheren Betrieb des Schwungradsystems in der Nähe des Bordmagnetometers oder Drehmomentwandlers ohne Hystereseverluste oder Beeinträchtigung der magnetischen Messgenauigkeit. Hervorragende Strahlungsbeständigkeit und langfristige Dimensionsstabilität gewährleisten, dass die Kugel ihre

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ursprüngliche Massenverteilung und Geometrie auch nach mehreren Jahren im Orbit beibehält, ohne zu quellen, zu reißen oder an Masse zu verlieren. Dadurch wird die Zuverlässigkeit der Lageregelung über die gesamte Lebensdauer des Satelliten sichergestellt.

Mit der rasanten Entwicklung von Kleinsatelliten und CubeSats treten die Vorteile der hohen Dichte von Wolframlegierungskugeln noch deutlicher hervor: Bei gleichem Drehimpuls können Volumen und Masse des Schwungrads erheblich reduziert werden. Dadurch wird wertvoller Platz an Bord und beim Startgewicht eingespart, um die Nutzlast zu erhöhen oder die Lebensdauer zu verlängern. Führende kommerzielle Satellitenkonstellationen haben Wolframlegierungs-Schwungradkugeln als Standardausrüstung eingeführt und damit eine Ära kostengünstiger und hochmanövrierfähiger Satellitennetzwerke eingeläutet. Wolframlegierungskugeln spielen eine entscheidende Rolle bei der Stabilisierung des Roboterarms von Raumstationen, der Ausrichtung von Mond- und Marslandern sowie im Energiespeichersystem der Schwungräder von Tiefraumsonden. Ihre langfristige Zuverlässigkeit im Vakuum, bei starken Temperaturschwankungen und in Umgebungen mit hoher Strahlung wurde durch zahlreiche Tests im Orbit bestätigt. Dank ihrer winzigen, aber präzisen Kugelform tragen Wolframlegierungskugeln die wichtigste „Richtungseigenschaft“ und das „Energiezentrum“ von Raumfahrzeugen und gehören damit zu den zuverlässigsten Trägheitselementen für die bemannte Raumfahrt, die sich vom erdnahen Orbit bis in den Tiefraum erstreckt.

#### **5.4 Anwendungen von Wolframlegierungskugeln in aufstrebenden und zukunftsweisenden Anwendungsgebieten**

Wolframlegierungskugeln erobern rasant die anspruchsvollsten Zukunftsfelder. Ihre extreme Dichte, exzellenten Hochtemperatureigenschaften, Strahlungstabilität und präzise Bearbeitbarkeit machen sie zu einem idealen Material, um aktuelle technologische Herausforderungen zu meistern und neue Möglichkeiten zu eröffnen. In Spitzentechnologien wie Hochenergielasersystemen, Hyperschallfahrzeugen, Kernfusionsanlagen, Kühlköpfen für Quantencomputer und der Erforschung extremer Weltraumbedingungen dienen Wolframlegierungskugeln nicht mehr nur als Gegengewichte oder Abschirmungskomponenten, sondern haben sich zu funktionalen Schlüsselementen entwickelt, die die Leistungsfähigkeit von Systemen maßgeblich unterstützen und die Grenzen der menschlichen Technologie kontinuierlich erweitern.

#### **Wolframlegierungskugeln für Laserwaffen und Hochenergiewaffensysteme**

Hochleistungslaser und gerichtete Energiesysteme stellen beispiellose Anforderungen an die Stabilität optischer Plattformen, Spiegeldrehtische und Energieübertragungsstrecken. Jede noch so kleine Vibration, thermische Drift oder Schwerpunktverlagerung kann die Stabilität der optischen Achse beeinträchtigen und die Strahlrichtgenauigkeit erheblich reduzieren oder sogar zum Totalausfall führen. Wolframlegierungskugeln haben sich aufgrund ihrer extrem hohen Dichte und perfekten Langzeit-Dimensionsstabilität als optimale Ausgleichs- und Schwingungsdämpfungselemente zur unauffälligsten und gleichzeitig unverzichtbaren Kernkomponente solcher Systeme entwickelt.

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



In optischen Hochenergielaserplattformen werden Wolframlegierungskugeln präzise in den Massenblock von Verstellmechanismen mit mehreren Freiheitsgraden oder aktiven Schwingungsisolationssystemen eingebettet. Ihre extrem hohe Dichte ermöglicht es dem System, ein extrem hohes Trägheitsmoment auf kleinstem Raum zu erzielen. Dies sorgt für eine starke Unterdrückung externer Schwingungen und gewährleistet eine Stabilität des Laserstrahls im Sub-Bogensekundenbereich, selbst bei starken Stößen, breitbandigen Schwingungen oder schnellen Manövern. Durch die Verwendung nichtmagnetischer Wolframlegierungskugeln werden Hystereseverluste und Wirbelstromwärme an Präzisionsspiegeln vollständig vermieden. Oberflächenpolitur der Spiegel und spezielle Beschichtungsverfahren reduzieren Streuung und sekundäre Wärmestrahlung zusätzlich und gewährleisten so eine stets optimale Strahlqualität. Bei fahrzeug-, luft- oder schiffsgestützten Energieplattformen werden Wolframlegierungskugeln häufig als dynamische Ausgleichsringe und Gegengewichte für Spiegel in Hochgeschwindigkeits- Drehtürmen eingesetzt. Ihre hohe Dichte ermöglicht dem Drehturm extrem hohe Winkelbeschleunigungen und Zielgeschwindigkeiten bei geringem Trägheitsmoment. Gleichzeitig absorbieren sie Vibrationsenergie beim Startrückstoß oder bei heftigen Plattformmanövern und verhindern so eine Fehlausrichtung der optischen Achse. Die hohe Temperaturstabilität der Wolframlegierungskugeln ermöglicht zudem einen Langzeitbetrieb unter der hohen thermischen Belastung von Lasern ohne Dimensionsänderungen oder Leistungseinbußen.

Eine hochmoderne Anwendung findet sich auf weltraumgestützten Testplattformen für gerichtete Energie, wo Wolframlegierungskugeln als Schwungradkugeln mit variabler Masse eingesetzt werden. Mittels elektromagnetischer oder mechanischer Verfahren wird die Massenverteilung in Echtzeit angepasst, um eine hochpräzise Feinabstimmung der Strahlrichtung zu erreichen. Ihre herausragende Leistungsfähigkeit unter den Bedingungen von Vakuum, extrem niedrigen Temperaturen und starker Strahlung ermöglicht es dem System, seine geplante Leistung im Orbit über lange Zeiträume wartungsfrei aufrechtzuerhalten. Diese winzigen Wolframlegierungskugeln tragen unauffällig zur Stabilität und Präzision der fortschrittlichsten optoelektronischen Systeme der Menschheit bei und sind somit ein Schlüsselmateriale für die praktische Anwendung von Laser- und gerichteten Energietechnologien, wodurch diese aus dem Labor in die Praxis überführt werden. Sie bringen den Traum vom „Punkt-und-Schuss“-Angriff einen Schritt näher an die Realität und bilden die zuverlässigste Grundlage für die zukünftige Ära hochenergetischer Photonenwaffen.

### **Wolframlegierungskugeln zum Auswuchten und Gegengewichten von Hyperschallfahrzeugen**

Hyperschallflugzeuge stehen vor extremen Anforderungen an die Schwerpunktkontrolle und den Wärmeausgleich unter extremen aerodynamischen Bedingungen, starken Vibrationen und komplexen Überlastbedingungen. Kugeln aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer unübertroffenen Dichte, hohen Temperaturbeständigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit und Oxidationsbeständigkeit als optimale Massenkontrollelemente zur Lösung dieser Herausforderung erwiesen.

Wolframlegierungskugeln sind präzise in bewegliche oder feste Gegengewichtskammern im Bug, den Flügelspitzen oder dem Heck des Flugzeugs eingebettet. Ihre extrem hohe Volumendichte ermöglicht eine präzise Anpassung des Schwerpunkts über einen weiten Bereich auf engstem Raum. Dadurch behält

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

das Flugzeug seine optimale aerodynamische Konfiguration und Stabilität über einen weiten Machzahlbereich bei. Nach der Beschichtung der Kugeloberfläche mit einer speziellen Hochtemperaturbeschichtung oder einer Rheniumlegierung bleiben Struktur und Masse auch unter aerodynamischen Erwärmungsbedingungen von Tausenden von Grad Celsius über lange Zeiträume unverändert. So wird sichergestellt, dass sich der Schwerpunkt nicht durch Ablation oder thermische Verformung verschiebt.

In Ansaugkrümmern, Brennraumstützringen und Abgasdüsenverstellmechanismen werden Kugeln aus Wolframlegierung als Hochtemperatur-Ausgleichskugeln und Schwingungsdämpfungskugeln eingesetzt. Ihre hohe Temperaturfestigkeit und ihr niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient ermöglichen es dem System, auch unter starken Temperaturschocks die geometrische Genauigkeit und die dynamische Balance beizubehalten und so Materialermüdung oder durch Schwingungskopplung verursachte Funktionsstörungen zu vermeiden. Die hohe Härte der Wolframlegierungskugeln sorgt zudem dafür, dass sie auch unter der Einwirkung von partikelhaltigen Hochgeschwindigkeitsluftströmen über lange Zeit verschleißfest sind und eine glatte Oberfläche sowie gleichbleibende Qualität gewährleisten.

Ein fortschrittlicherer Ansatz besteht darin, die Wolframlegierungskugeln als variable Gegengewichtsanordnung zu konstruieren. Mittels elektromagnetischer Antriebe oder Formgedächtnismechanismen passen die Kugeln ihre Positionen während des Fluges in Echtzeit an und erreichen so eine dynamische und optimale Abstimmung zwischen Schwerpunkt und Schubvektor. Dies gewährleistet, dass das Flugzeug auch in Extremsituationen wie der Zündung des Staustrahltriebwerks, bei Kurskorrekturen oder beim Wiedereintritt in die Atmosphäre eine optimale Fluglage beibehält. Diese aktive Gegengewichtstechnologie mit Wolframlegierungskugeln hat sich zu einer der Schlüsseltechnologien für Hyperschallplattformen der sechsten Generation entwickelt.

Wolframlegierungskugeln in Hyperschallfahrzeugen haben nicht nur deren Manövrierfähigkeit, Stabilität und Überlebensfähigkeit deutlich verbessert, sondern auch die solideste materielle Grundlage für die Menschheit geschaffen, die Schallmauer zu durchbrechen und rasante globale Reisen sowie Weltraumreisen zu ermöglichen. In ihrer winzigen Kugelform verkörpert sie den großen Traum der Menschheit von der Eroberung des Hyperschallzeitalters und ist zu einem der hellsten, aber verborgenen Sterne der Hyperschalltechnologie- Revolution geworden.

### **Wolframlegierungskugeln für Tiefsee-Erkundungsfahrzeuge und U-Boote**

Die Anforderungen an Ballastsysteme in Tiefsee-Explorationsfahrzeugen und bemannten/unbemannten Tauchbooten haben die Materialwissenschaft auf ein neues Niveau gehoben: Sie müssen enorme Masse auf kleinstem Raum bereitstellen, um dem immensen Auftrieb des Wasserdrucks in Tiefen von Zehntausenden Metern standzuhalten. Gleichzeitig müssen die Materialien selbst überragende Beständigkeit gegen Meerwasserkorrosion, extrem hohe Druckfestigkeit und langfristige Dimensionsstabilität aufweisen sowie völlig ungiftig und umweltfreundlich sein. Wolframlegierungskugeln mit ihrer unübertroffenen Schüttdichte, exzellenten Korrosionsbeständigkeit und zuverlässigen mechanischen Eigenschaften haben sich zum absolut bevorzugten Material für

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

Ballastsysteme in allen aktuellen Tiefseeegeräten entwickelt und sind fester Bestandteil des gesamten Spektrums von Tiefseeeplattformen – von wissenschaftlichen Expeditionen über die Rohstoffexploration und den Meeresbodenbau bis hin zur Ultratiefseeforschung.

Bei der Konstruktion von bemannten Tiefsee-U-Booten wie dem „Striver“, ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugen (ROVs) und autonomen Unterwasserfahrzeugen (AUVs) werden Wolframlegierungskugeln dicht in speziellen Ballasttanks außerhalb oder innerhalb des Druckkörpers gepackt. Diese bilden entweder abwerfbaren oder festen Ballast. Abwerfbare Wolframlegierungskugeln sind typischerweise in modularen Kugelsäcken oder Kugelboxen angeordnet und erzeugen den notwendigen negativen Auftrieb, um den Eigenauftrieb der Ausrüstung während des Abstiegs zu überwinden. Nach Erreichen der Zieltiefe werden je nach Bedarf Kugeln abgeworfen, um neutralen Auftrieb beim Schweben oder Aufsteigen für die Rückkehr zu erreichen. Verglichen mit herkömmlichen Gusseisen- oder Bleiblocken benötigt diese Methode nur etwa ein Drittel des Volumens bei gleicher oder sogar größerer Ballastmasse. Dadurch kann das U-Boot mehr wissenschaftliche Instrumente, Roboterarme oder Probenahmegeräte bei gleicher Druckkörpergröße transportieren, was die Betriebseffizienz und den wissenschaftlichen Ertrag erheblich steigert.

Fest installierte Ballastkugeln aus Wolframlegierung am Boden oder an den Seiten des Tauchboots sorgen für eine dauerhafte Abwärtsverlagerung des Schwerpunkts und eine stabile Lage. Ihre extrem hohe Druckfestigkeit gewährleistet, dass sie selbst unter dem Wasserdruck von Zehntausenden Metern keine Verformungen zeigen und sich nur minimal verändern. Dies garantiert die Lagestabilität des Tauchboots in komplexen Meeresströmungen und unebenem Meeresboden. Die Ungiftigkeit der Wolframlegierungskugeln eliminiert das Risiko einer Meeresverschmutzung durch Bleiballast vollständig. Eine spezielle Oberflächenpassivierung oder Titanbeschichtung verleiht ihnen zudem eine nahezu dauerhafte Beständigkeit gegen Meerwasserkorrosion. Selbst bei Langzeiteinsätzen in Tiefseegebieten mit hydrothermalen Quellen und Schwefelwasserstoff bleibt die Oberfläche makellos, ohne Korrosionsprodukte oder Gewichtsverlust.

Für Langzeit-Unterwasserausrüstung wie Knotenpunkte von Meeresbodenbeobachtungsnetzen, Meeresbodenbohranlagen und Meeresbodenbergbaumaschinen werden Wolframlegierungskugeln als Fundamentballast und zur Stabilisierung der Verankerung eingesetzt. Ihre hohe Dichte ermöglicht es der Ausrüstung, fest auf weichem Meeresbodenschlamm oder an Hängen zu stehen, ohne dass ein großes Betonfundament erforderlich ist. Gleichzeitig erleichtert ihre Kugelform das präzise Ausbringen und Bergen durch Unterwasserroboter. Die Langzeitstabilität der Wolframlegierungskugeln in der komplexen Umgebung der Tiefsee mit hohem Druck, niedrigen Temperaturen und hohem Salzgehalt wurde durch zahlreiche Seeversuche in Tiefen von Zehntausenden von Metern nachgewiesen. Dies macht sie zur zuverlässigsten Ballastgarantie für die bemannte Erforschung des Marianengrabs, des Kermadecgrabs und anderer extrem tiefer Meeresgebiete.

Mit der Entwicklung von Festkörperbatterien für die Tiefsee, Hochdruck-Auftriebsmaterialien und intelligenten Ballastsystemen rücken Wolframlegierungskugeln immer stärker in den Fokus: Sie entwickeln sich hin zu Kugeln mit variabler Dichte und intelligenter Ballastfreisetzung. Durch

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

funktionelle Oberflächenbeschichtungen oder eine gezielte Mikrostrukturierung können sich die Kugeln unter bestimmten Bedingungen langsam auflösen und Ballast freisetzen oder ihre effektive Masse verändern. Dies verbessert die Energieeffizienz und die operative Flexibilität von Tauchbooten. Wolframlegierungskugeln, die selbst unter extremsten Bedingungen der Tiefsee zuverlässig funktionieren, begleiten die Menschheit bei der kontinuierlichen Erforschung neuer Tiefseegebiete und sind zu einem der wichtigsten Materialien für die Erschließung der letzten Grenzen der Erde geworden.

#### 5.4.5 Wolframlegierungskugel für 5G-Kommunikationsbasisstationsfilteroszillator

Die Filter von 5G-Basisstationen setzen beispiellos hohe Maßstäbe hinsichtlich Massenverteilung, Dimensionsstabilität, thermischer Leistung und Langzeitstabilität von Oszillatoren. Kugeln aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer extrem hohen Dichte, hervorragenden Wärmeausdehnungsanpassung, herausragenden Ermüdungsbeständigkeit und präzisen Bearbeitbarkeit als ideales Abstimmungs- und Ausgleichselement für Oszillatoren in großflächigen MIMO-Antennen und Hochleistungs-Hohlraumfiltern etabliert und treiben die kontinuierliche Weiterentwicklung von 5G-Netzen hin zu höheren Frequenzen, größeren Bandbreiten und geringeren Latenzzeiten voran.

In 5G Massive-MIMO-Antennen und HF-Frontend-Filtern erfordert die Optimierung von Resonanzfrequenz und Bandbreite des Vibrators eine präzise Massenbeladung. Wolframlegierungskugeln werden präzise in die Enden, die Mitte oder die Spitze des Vibratorarms eingebettet oder geklebt. Ihre extrem hohe Volumendichte ermöglicht es, die Resonanzfrequenz des Vibrators deutlich zu reduzieren, ohne seine äußeren Abmessungen zu verändern, oder das Vibratorvolumen bei gleicher Frequenz drastisch zu verringern. Dadurch wird ein größerer Elementabstand und eine geringere gegenseitige Kopplungsinterferenz für das Antennenarray erzielt. Die Kugeloberfläche ist hochglanzpoliert und mit einer Spezialbeschichtung versehen, die nicht nur eine absolut gleichmäßige Massenverteilung gewährleistet, sondern auch die durch hochfrequente Oberflächenströme verursachten Skin-Effekt-Verluste stark reduziert und so die Einfügungsdämpfung des Filters minimiert.

In Hochleistungs-Basisstationsfiltern spielen Wolframlegierungskugeln eine entscheidende Rolle für den Wärmeausgleich und die Beständigkeit gegen thermische Verformung. Ihre Wärmeausdehnungskoeffizienten sind optimal auf die des Kupfer- oder Aluminium-Oszillatorsubstrats abgestimmt. Bei starken Temperaturanstiegen durch die Hochleistungsübertragung dehnen sich die Kugeln synchron mit dem Oszillator aus und ziehen sich zusammen. Dadurch werden Frequenzdrift und strukturelle Risse durch thermische Spannungskonzentrationen verhindert. Gleichzeitig ermöglicht die hervorragende Wärmeleitfähigkeit der Wolframlegierungskugeln eine schnelle Wärmeableitung zum Oszillatorsubstrat. In Kombination mit Luft- oder Flüssigkeitskühlung im Filterhohlraum wird die Oszillatortemperatur in einem sicheren Bereich gehalten. So wird sichergestellt, dass die Basisstation auch unter Volllastbetrieb Frequenzstabilität und Leistung beibehält.

Durch den Einsatz nichtmagnetischer Wolframlegierungskugeln werden die negativen Auswirkungen von Hystereseverlusten und Wirbelstromwärme auf den Q-Faktor des Filters vollständig eliminiert.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Insbesondere bei Dual-Mode-Filtern, die Sub-6-GHz- und Millimeterwellentechnologien kombinieren, ermöglicht diese Eigenschaft dem System eine extrem hohe Selektivität und Isolation über ein breites Frequenzband. Die hohe Härte und Dauerfestigkeit der Kugeln gewährleisten zudem, dass sie ihre Position und Qualität auch unter langfristigen Vibrations- und Temperaturwechselbedingungen in Basisstationen beibehalten. Dadurch werden die bei herkömmlichen Stahl- oder Keramikugeln häufig auftretenden Probleme wie Lockerung, Verschleiß oder Bruch vermieden.

In der Vorforschungsphase von 6G und der Erforschung der Terahertz-Kommunikation werden Wolframlegierungskugeln zur präzisen Abstimmung ultraminiaturisierter Resonatoren und Metamaterialeinheiten eingesetzt. Ihre hohe Dichte und geringe Wärmeausdehnung ermöglichen es dem Oszillator, seine Resonanzgenauigkeit auch bei höheren Frequenzen und extremen thermischen Belastungen beizubehalten. Dies bietet eine entscheidende Materialgrundlage für zukünftige Fortschritte in der drahtlosen Kommunikation hin zu höheren Frequenzbändern. Diese winzigen Wolframlegierungskugeln regulieren unauffällig den präzisen Fluss enormer Mengen an Hochfrequenzsignalen und werden so zu unsichtbaren, aber unverzichtbaren „Frequenzwächtern“ für 5G- und zukünftige 6G-Netze, die die ganze Welt abdecken und das Internet der Dinge ermöglichen. Sie machen jede Basisstation zu einem zuverlässigen Knotenpunkt im Datennetz und ermöglichen so einen weiteren qualitativen Sprung in der menschlichen Kommunikation.

#### 5.4.6 Hochwertiger Uhrenrotor und automatische Aufzugskugel aus Wolframlegierung

In den Augen schweizerischer und deutscher Uhrmachermeister haben Kugeln aus Wolframlegierung die Grenzen gewöhnlicher Metalle längst überschritten und sind zum unverzichtbaren Material für den automatischen Rotor und das Aufzugssystem von mechanischen Spitzenuhren geworden. Dank ihrer extremen Dichte, perfekten Formstabilität, ihres faszinierenden metallischen Glanzes und ihrer hervorragenden Verträglichkeit mit Edelmetallen hat sie die mechanische Ästhetik und die Leistungsfähigkeit von Armbanduhren auf ein neues Niveau gehoben und ist zu einem charakteristischen Merkmal renommierter Marken wie Patek Philippe, Vacheron Constantin, A. Lange & Söhne, Rolex und Omega geworden.

Der automatische Rotor ist das Herzstück einer mechanischen Uhr und ermöglicht den automatischen Aufzug. Seine Masse und Schwerpunktverteilung bestimmen maßgeblich die Aufzugseffizienz, den Tragekomfort und die dynamische Balance. Wolframlegierungskugeln werden präzise in den Rand oder das Innere eines Rotors aus 18-karätigem Gold, Platin oder Titan eingelassen oder eingeschraubt und bilden so verschiedene Formen wie Halbmond, Vollkreis oder Mikrorotor. Die extrem hohe Dichte der Wolframlegierung ermöglicht es dem Rotor, innerhalb eines sehr kleinen Radius ein Trägheitsmoment zu erzeugen, das das von Gold oder Platin bei Weitem übertrifft. Der Träger muss lediglich sein Handgelenk leicht bewegen, damit der Rotor die kinetische Energie effizient auf die Zugfeder überträgt und so einen schnelleren und gleichmäßigeren Vollaufzug erreicht. Verglichen mit der groben Bauweise traditioneller Messingrotoren mit Gegengewichtsschrauben ermöglichen die Wolframlegierungskugeln eine Rückkehr zu rein geometrischer Ästhetik im Rotordesign: elegantere Linien, geringere Dicke und optische Transparenz bei gleichzeitig höherer Aufzugsleistung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Oberflächenbehandlung ist der sorgfältigste Schritt bei der Verwendung von Wolframlegierungskugeln in der Uhrmacherei. Nach Dutzenden von Hochglanzpoliervorgängen weist die Kugel einen tiefen, metallischen Spiegelglanz auf, der einen kühlen und luxuriösen Kontrast zum Rotor aus Roségold, Platin oder Kohlefaser bildet. Einige Spitzenmodelle verfügen sogar über eine hauchdünne PVD-Beschichtung aus Schwarzgold oder Blau auf der Oberfläche der Wolframlegierungskugel, wodurch diese unter verschiedenen Lichtverhältnissen eine geheimnisvolle, an den Weltraum erinnernde Struktur erzeugt. Die Kugel wird mittels Mikroschrauben, Inlays oder Laserschweißen am Rotorkörper befestigt, sodass sie sich auch nach Jahrzehnten oder gar Jahrhunderten des Gebrauchs nicht lockern oder verschieben kann.

Bei ultraflachen und komplexen Uhren treten die Vorteile von Wolframlegierungskugeln noch deutlicher hervor. Miniaturisierte automatische Aufzugssysteme bieten oft nur extrem begrenzten Platz, und traditionelle Edelmetalle können nicht mehr die erforderliche Trägheit gewährleisten. Wolframlegierungskugeln hingegen ermöglichen eine hohe Masse auf kleinstem Raum, sodass Uhrmacher bidirektionale oder externe Miniaturrotoren in Gehäuse mit einer Dicke von weniger als zehn Millimetern integrieren können. Dies ermöglicht es, dass hochkarätige Komplikationen wie ultraflache Minutenrepetitionen, ewige Kalender und Schleppzeigerchronographen über zuverlässige automatische Aufzugsfunktionen verfügen. Einige Pioniere haben sogar das Konzept eines „Vollwolframrotors“ eingeführt, der eine Wolframlegierungskugel mit einer Wolframlegierungsplatte kombiniert und so den Rotor selbst zu einem kühlen, puristischen Kunstwerk der Industrie macht.

Die Kugel aus Wolframlegierung eliminiert vollständig das Risiko einer Magnetisierung der Unruhspirale und der Hemmung. Ihre Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit sorgt dafür, dass sie trotz täglicher Einwirkung von Schweiß, Parfüm und Meerwasser über Jahrzehnte wie neu aussieht. Diese Fähigkeit, höchste Leistungsfähigkeit mit höchster Ästhetik zu vereinen, erhebt die Wolframlegierungskugel von einem unauffälligen Material zum unmittelbaren Symbol einer Spitzenuhr. Wenn Uhrenliebhaber von „Wolframstahl“, „Wolframkohlenstoff“ oder „schwarzem Wolfram“ sprechen, meinen sie mehr als nur Härte; sie drücken ihre gemeinsame Bewunderung für höchste Handwerkskunst und edler Materialien aus. So kann jede mechanische High-End-Uhr nicht nur die Zeit anzeigen, sondern auch das höchste menschliche Streben nach Präzision und Schönheit verkörpern.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungskugeln

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Kapitel 6 : Häufige Qualitätsprobleme und Lösungen für Kugeln aus Wolframlegierungen

### 6.1 Ursachen und Beseitigungsmethoden von Oberflächenrissen in Wolframlegierungskugeln

Oberflächenrisse sind der häufigste und am leichtesten erkennbare Qualitätsmangel bei Kugeln aus Wolframlegierungen. Kleine Risse können das Aussehen und die Korrosionsbeständigkeit beeinträchtigen, während größere Risse zu Materialermüdung oder Walzbruch führen können. Ihr Entstehungsmechanismus ist komplex und betrifft nahezu alle Schlüsselprozesse wie Rohmaterialien, Umformung, Sintern, Wärmebehandlung und Schleifen. Nur durch die Kombination von systematischer Ursachenanalyse und mehrdimensionaler Prävention lässt sich ihre Auftretensrate prinzipiell auf nahezu null reduzieren.

Die Hauptursache für Rissbildung liegt im Ungleichgewicht der Eigenspannungen während des Sinter- und Abkühlprozesses. Beim Flüssigphasensintern erstarrt die Bindemittelphase rasch und schrumpft, während das Wolframpartikelgerüst kaum schrumpft. Der Unterschied in ihren Wärmeausdehnungskoeffizienten erzeugt beim Abkühlen erhebliche Zugspannungen. Übersteigt diese Spannung die lokale Festigkeit der Bindemittelphase, bilden sich Mikrorisse an oder nahe der Oberfläche. Zu hohe Abkühlgeschwindigkeiten, ungleichmäßige Temperaturfelder im Ofen, eine zu hohe Rohlingsbeladungsdichte oder ein Dichtegradient im Rohling selbst können diese Spannungskonzentration deutlich verstärken. Kaltpressrisse aus der Formgebungsphase oder Restfalten von isostatisch gepressten Gummiformen können sich beim Sintern ebenfalls zu sichtbaren Rissen ausweiten.

Der Schleifprozess ist eine weitere Hauptursache für Risse. Beim mehrstufigen Schleifen können unzureichender Materialabtrag, zu grobes Schleifmittel, ungenügende Kühlung oder zu hoher Schleifdruck Mikrorisse in der harten und spröden Wolframpartikelschicht erzeugen. Die typische Zweiphasenstruktur von Wolframlegierungskugeln – mit ihrem ausgeprägten Wolframpartikelgerüst und der darunterliegenden Bindemittelphase – macht sie besonders empfindlich gegenüber Schleifprozessen. Sobald die Prozessparameter aus dem Gleichgewicht geraten, breiten sich Mikrorisse rasch entlang der Wolframpartikelgrenzen aus und bilden schließlich sichtbare Netzwerk- oder Radialrisse. Eine unsachgemäße Wärmebehandlung (z. B. eine zu niedrige Vakuumglühtemperatur oder zu hohe Aufheiz- und Abkühlraten) kann zudem Zugspannungen an der Oberfläche erhalten oder erneut hervorrufen und so einen Nährboden für spätere Risse schaffen.

Um Oberflächenrisse zu vermeiden, ist eine geschlossene Regelung des gesamten Prozesses von Anfang bis Ende erforderlich. Zunächst muss der Sinterprozess optimiert werden: Mehrsegmentige, langsame und drehzahlkontrollierte Abkühlkurven sind einzusetzen, der Phasenübergangspunkt der Bindemittelphase ist präzise auf die Halteplattform abzustimmen, und ein ausreichender Abstand zwischen den Rohlingen und Kugeln im Ofen ist sicherzustellen, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu gewährleisten. Bei Kugeln mit großem Durchmesser oder hohem Wolframgehalt ist ein isothermer Zwischentemperprozess durchzuführen, um die Spannungen in der flüssigen Phase vollständig abzubauen. Zweitens ist die Dichtehomogenität während der Formgebung zu

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verbessern. Kaltisostatisches Pressen ist dem unidirektionalen Formen vorzuziehen, und alle Rohlinge werden nach dem Pressen einer Röntgen- oder Ultraschall-Dichteprüfung unterzogen. Rohlinge mit einem Dichtegradienten, der den Standard überschreitet, werden direkt im Ofen nachgeschmiedet.

Der Schleifprozess folgt dem Prinzip „kleine Chargen, mehrere Durchgänge, Feinschleifen und Polieren“: Beim Grobschleifen kommen hochfeste Keramikkörper und ausreichend Kühlmittel zum Einsatz, beim Mittel- und Feinschleifen wird die Abtragsrate schrittweise reduziert. In den abschließenden drei bis fünf Polierschritten werden Nanodiamant-Suspensionen und magnetorheologische oder ultraschallgestützte Verfahren eingesetzt, um die Bearbeitungsschäden vollständig zu entfernen. Nach jedem Schleifschritt werden alle Kugeln einer Hochdruck-Ultraschallreinigung und einer 100%igen Prüfung mit einem automatischen optischen Rissdetektor unterzogen. Verdächtige Risse werden sofort nachpoliert oder die Kugeln aussortiert.

Im Wärmebehandlungsprozess wird das Langzeit-Spannungsarmglühen bei niedriger Temperatur als Standard-Nachbehandlung eingesetzt. Für Präzisions- und Medizinprodukte werden zusätzlich Sekundärglühen und Tiefkühlzyklen mit flüssigem Stickstoff durchgeführt, um Restspannungen weiter abzubauen. Chemische Oberflächenpassivierung oder Dünnschicht-PVD-Beschichtung können potenzielle Mikrorissbildungspunkte effektiv abdichten und die Korrosionsbeständigkeit verbessern. Dank dieser systematischen und vielschichtigen Verfahrenstechnik konnten führende Unternehmen der Branche die Häufigkeit von Oberflächenrissen auf weniger als einen Riss pro 10.000 Chargen reduzieren und sogar über mehrere Jahre hinweg keine Kundenreklamationen mehr verzeichnen. Oberflächenrisse haben sich somit von einem hartnäckigen Problem zu einem vermeidbaren und kontrollierbaren Routineindikator entwickelt. Dies gewährleistet die höchste Qualitätssicherung für Wolframlegierungskugeln und sichert absolutes Vertrauen in anspruchsvollsten Anwendungsszenarien.

## **6.2 Justierung und Vermeidung von Maßabweichungen außerhalb der Toleranz bei Kugeln aus Wolframlegierung**

Maßabweichungen außerhalb der Toleranzgrenzen stellen das größte Qualitätsproblem dar, das die Austauschbarkeit und Montagesicherheit von Wolframlegierungskugeln beeinträchtigt. Dies gilt insbesondere für Anwendungen mit absoluten Anforderungen an die geometrische Präzision, wie beispielsweise medizinische Kollimatoren, Präzisionslager, Metrologiegewichte und hochwertige Uhrenrotoren. Eine einzige Kugel außerhalb der Toleranz kann zur Rücksendung einer gesamten Charge oder sogar zum Systemausfall führen. Die Ursachen dieser Abweichungen sind im gesamten Prozess des Formens, Sinterns und Schleifens miteinander verknüpft. Nur durch die Etablierung eines vollständig geschlossenen Regelkreises – von der Prävention an der Quelle bis zur präzisen Kompensation am Ende – lässt sich langfristig höchste Maßgenauigkeit gewährleisten.

Die Formgebung ist die erste Quelle für Maßabweichungen. Obwohl das Kaltisostatische Pressen dem Kompressionsformen überlegen ist, können bei alternder Gummiform, unvollständiger Entlüftung oder ungleichmäßiger Druckübertragung dennoch lokale Erhebungen oder Vertiefungen auf der Oberfläche des Rohlings entstehen, die die Sinterkugeln direkt beeinträchtigen. Kaltpressen ist anfälliger für

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Dichteunterschiede zwischen Ober- und Unterseite, was zu ungleichmäßiger Sinterschrumpfung und letztendlich zu übermäßiger Elliptizität im Durchmesser führt. Die Lösung liegt in der sorgfältigen Wartung von Formen und Anlagen: regelmäßiger Austausch der Gummiformen, strikte Vakuumentlüftung vor dem Pressvorgang, Echtzeit-Synchronisation und Laserscanning jedes Rohlings in Originalgröße. Jeder Rohling, der die Toleranz überschreitet, wird direkt im Ofen nachgeformt, wodurch potenzielle Maßabweichungen von vornherein vermieden werden.

Die Sinterschrumpfung ist der größte Faktor für Maßabweichungen. Beim Flüssigphasensintern tragen sowohl die Benetzung und Umlagerung der Bindemittelphase als auch die Auflösung und Wiederausfällung von Wolframpartikeln zur Gesamtschrumpfung bei. Die Schrumpfrate wird von einer Kombination von Faktoren beeinflusst, darunter Temperatur, Haltezeit, Ofenatmosphäre und die Art der Rohlingsbeladung. Kugelförmige Werkstücke können an verschiedenen Stellen im selben Ofen aufgrund geringfügiger Unterschiede im Temperaturfeld ungleichmäßig schrumpfen, was zu einer verstärkten Durchmesserstreuung führt. Die effektivste Präventivmaßnahme in der Industrie ist die Einrichtung eines „digitalen Zwillings“-Sintersystems: Vor jedem Ofendurchlauf wird die tatsächliche Schrumpfrate mithilfe von Testrohlingen präzise gemessen und der Solldurchmesser in Echtzeit korrigiert. Im Ofen sorgen eine unabhängige Mehrzonen-Temperaturregelung und rotierende Mullit-Trays für ein gleichmäßiges Temperaturfeld in alle Richtungen. Präzisionskugeln werden in einer einzigen Schicht in den Ofen geladen, um durch Stapelung verursachte Schrumpfungsgradienten vollständig zu eliminieren. Hochwertige Produktionslinien setzen sogar optische Durchmessermesssysteme ein, um die Schrumpfkurve während des Hochtemperatur-Sinterprozesses in Echtzeit zu überwachen und so eine Regelung mit geschlossenem Regelkreis zu erreichen.

Der Schleifprozess ist der letzte Schritt zur Erzeugung und Kompensation von Maßabweichungen. Traditionelles Chargenschleifen neigt aufgrund von Verschleiß der Schleifmittel, Konzentrationsdrift der Schleifflüssigkeit oder Kollisionen zwischen den Kugeln zu Maßstreuungen. Präzisionskugeln sind gegenüber solchen Ungenauigkeiten kaum tolerant. Die moderne Lösung besteht in der vollständigen Umstellung auf ein Verfahren, das „Einzelkugel-Präzisionsschleifen“ und „gestuftes Kompensationsschleifen“ kombiniert: Grob- und Mittelschleifen erfolgen weiterhin mit hochpräzisen Planeten- oder Vertikalschleifmaschinen. Nach jedem Schleifgang werden die Kugeln jedoch vollautomatisch per Laser sortiert, um sie entsprechend ihrer tatsächlichen Größe in Dutzende schmale Intervalle zu unterteilen. Die Feinschleif- und Polierprozesse nutzen individuelle Formeln, Anlagen und Parameter zur gezielten Kompensation und zum Abtragen von Material. Abschließend werden alle Kugeln präzise auf die vorgegebene Maßtoleranzzone normiert. Ultrapräzise Kugeln für medizinische Anwendungen und die Metrologie gehen noch einen Schritt weiter: Hier werden Einzelkugeln robotergestützt zugeführt und magnetorheologisch oder per Ionenstrahl präzise bearbeitet, um sicherzustellen, dass Durchmesser und Kugelform jeder einzelnen Kugel unabhängig voneinander kontrollierbar sind.

Das oberste Ziel zur Vermeidung von Maßabweichungen ist eine lückenlose Datenkette im gesamten Prozess. Moderne Fabriken haben ein einzigartiges QR-Code-System implementiert, das alle Daten vom

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pulvermischprozess über Pressprotokolle, Sinterofenzyklen und Mahlvorgänge bis hin zu den Endabmessungen verknüpft. Jede Charge mit Maßabweichungen lässt sich innerhalb von Sekunden zum Ursprungsprozess zurückverfolgen, und die Prozessparameter können schnell angepasst werden. In Kombination mit KI-gestützten Vorhersagemodellen kann das System sogar die endgültige Größenverteilung während der Formgebung vorhersagen und Press- und Sinterparameter im Voraus anpassen, um Abweichungen von vornherein zu vermeiden.

Durch den zuvor beschriebenen systematischen Ansatz der Fehlervermeidung, der präzisen Prozesssteuerung, der Endrohrkompensation und des geschlossenen Datenmanagements konnten führende Unternehmen der Branche die Chargendurchmesserabweichung von Präzisionskugeln aus Wolframlegierung im Mikrometerbereich stabilisieren und eine Konsistenz von zehn Mikrometern für Kugeln normaler Güte problemlos erreichen. Damit wird die höchste Anforderung selbst anspruchsvollster Kunden nach „tausenden exakt gleichen Kugeln“ vollends erfüllt.

### **6.3 Umgang mit dem Problem der ungleichmäßigen Dichte und Entmischung von Wolframlegierungskugeln**

Ungleichmäßige Dichte und Entmischung sind die heimtückischsten und zerstörerischsten Qualitätsmängel von Wolframlegierungskugeln. Treten sie auf, können sie zu Abweichungen in der Chargenleistung führen oder sogar Gegengewichtsversagen, Abschirmungsleckagen oder Trägheitsungleichgewichte verursachen und im schlimmsten Fall die gesamte Anlage gefährden. Die Ursache liegt in den Dichteunterschieden und Unterschieden im Benetzungsverhalten zwischen Wolfram und der Bindemittelphase im Mikrobereich. Nur durch eine systematische Kontrolle entlang der gesamten Prozesskette – vom Mischen des Pulvers über die Sinterverdichtung bis hin zur Abkühlung und Erstarrung – lassen sich ihre Auswirkungen auf ein vernachlässigbares Maß reduzieren.

Die Pulvermischphase ist der Hauptgrund für Entmischung. Wolframpulver unterscheidet sich in seiner Dichte deutlich von Nickel-, Eisen- und Kupferpulver. Selbst geringfügige Totzonen oder unzureichende Mischzeit in herkömmlichen V- oder Doppelkegelmischern können zu einer lokalen Anreicherung oder Verarmung der Bindemittelphase führen. Die ausgereifteste Lösung in der Industrie ist der Einsatz einer hochenergetischen Planetenkugelmühle oder eines dreidimensionalen Wirbelmischers in Kombination mit Sprühtrocknungsgranulation. Dadurch wird sichergestellt, dass jedes Wolframpulverpartikel gleichmäßig mit der Bindemittelphase und dem organischen Beschichtungsmittel umhüllt wird, wodurch nahezu kugelförmige Verbundpartikel entstehen. So werden Schwerkraftschichtung und Vibrationsentmischung direkt an der Quelle vermieden. Unmittelbar nach dem Mischen werden Proben für metallografische Querschnittsanalysen und energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDS) entnommen. Jegliche Anzeichen von Entmischung führen zu einem erneuten Mischen der gesamten Charge, um sicherzustellen, dass das Pulver, das in die Formgebungsphase gelangt, eine ideale Homogenität auf mikroskopischer Ebene aufweist.

Ungleichmäßige Druckübertragung während des Formprozesses ist ein weiterer wichtiger Faktor. Eine mangelhafte Stempelsynchronisation oder übermäßige Reibung an den Formwänden beim Kaltpressen

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

können Dichtegradienten im Rohling erzeugen. Obwohl das isostatische Pressen dem Kaltpressen überlegen ist, können Alterungsprozesse der Gummiform oder unzureichende Entlüftung dennoch zu lokal begrenzten Bereichen mit geringer Dichte führen. Die Lösung liegt in der prozessübergreifenden Drucküberwachung und der Rohlingdichtemessung: Kaltpressen sind mit Mehrpunkt-Drucksensoren zur Echtzeitkorrektur ausgestattet; Dichtemessblöcke sind im Gehäuse der isostatischen Presse vorinstalliert, um sie nach dem Pressvorgang im selben Durchgang zu entnehmen und zu überprüfen; und alle Rohlinge müssen nach dem Entformen einer Röntgen- oder Ultraschall-Dichteprüfung unterzogen werden, wobei auffällige Bereiche sofort aussortiert oder in den Ofen zurückgeführt werden.

Die Sinterphase birgt ein hohes Risiko für Dichteinhomogenitäten und Entmischung. Steigt die Temperatur beim Flüssigphasensintern zu schnell an oder ist die Haltezeit unzureichend, kann die Binderphase die Wolframpartikel vor lokalem Fließen nicht vollständig benetzen. Dies führt zu Bereichen geringer Dichte oder bindemittelreichen Zonen. Wird die Abkühlgeschwindigkeit während der Abkühlphase unkontrolliert, können ungleichmäßige Erstarrung und Schrumpfung der Binderphase am Wolframgerüst ziehen und so innere Hohlräume oder Entmischungszonen bilden. Die effektivste Präventions- und Kontrollmaßnahme ist ein „segmentierter, präziser thermischer Prozess“: In der Aufheizphase wird die Temperatur in mehreren Stufen langsam erhöht, um ein gleichmäßiges Aufschmelzen der Binderphase zu gewährleisten. In der Flüssigphasen-Haltephase wird das optimale Benetzungsfenster präzise eingestellt, damit sich die Wolframpartikel vollständig neu anordnen, auflösen und ausfällen können. In der Abkühlphase wird eine programmierte Abkühlung mit schnellem Beginn und anschließender Verlangsamung durchgeführt. In Kombination mit einem Drehteller im Ofen und der unabhängigen Beheizung mehrerer Zonen werden Temperaturgradienten vollständig vermieden. Bei hochmodernen Produktionslinien wird sogar eine Röntgenbildgebung vor Ort eingesetzt, um die Gleichmäßigkeit der Sinterungsschrumpfung zu überwachen. Bei der Erkennung von Anomalien werden die Parameter sofort angepasst.

Eine nachfolgende Wärmebehandlung und ein Schleifprozess können bestehende Entmischungen ebenfalls beseitigen. Langfristiges Vakuumglühen bei niedrigen Temperaturen fördert die Diffusion und Homogenisierung der restlichen Bindemittelphase, während ultraschallunterstütztes Schleifen die Gesamthomogenität durch das Abtragen einer geringen Menge der entmischten Oberflächenschicht verbessert. Entscheidend ist jedoch nach wie vor die absolute Stabilität der vorhergehenden Prozesse. Nur wenn die Homogenität der drei Hauptphasen – Mischen, Formen und Sintern – maximal gewährleistet ist, kann in den nachfolgenden Phasen ein nachträgliches Eingreifen vermieden werden.

Durch einen systematischen Engineering-Ansatz, der die Granulierung von Rohmaterialien, die Druckverteilung beim Formen, die segmentierte thermische Steuerung beim Sintern, die Optimierung des Kühlgradienten und die durchgängige zerstörungsfreie Dichtemessung umfasst, haben führende Unternehmen der Branche die interne Dichteabweichung von Wolframlegierungskugeln auf ein nahezu nicht messbares Niveau reduziert. Dies ermöglicht ihnen, selbst in anspruchsvollsten Anwendungen wie medizinischen Kollimatoren, Präzisionsschwungrädern und Kernschutzabschirmungen eine hohe Gleichmäßigkeit über Tausende von Kugeln hinweg zu erreichen. Dichteinhomogenitäten und -entmischungen, die einst als unvermeidbare Prozessfehler galten, sind heute vermeidbare, messbare und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

kontrollierbare Routineindikatoren. Sie bilden die Grundlage für die intrinsische Qualitätssicherung von Wolframlegierungskugeln und gewährleisten so absolute Zuverlässigkeit in Spitzenanwendungen.

#### **6.4 Verbesserung der Porosität und Lockerheitsdefekte auf der Oberfläche von Wolframlegierungskugeln**

Oberflächenporosität und -lockerheit stellen die größten Herausforderungen beim Verdichtungsprozess von Wolframlegierungskugeln dar. Sie beeinträchtigen nicht nur die Oberflächenglätte und Korrosionsbeständigkeit, sondern können auch zu Rissbildung und Festigkeitsschwächen bei nachfolgenden Schleif- und Polierprozessen führen und sogar ganze Chargen von hochwertigen medizinischen Kollimatkugeln oder Präzisionslagerkugeln unbrauchbar machen. Der Entstehungsmechanismus beruht im Wesentlichen auf unvollständigem Gasaustritt oder unzureichender Flüssigkeitsfüllung während des Sinterns. Nur durch systematische Verbesserungen der gesamten Prozesskette – von den Rohmaterialien über die Formgebung und das Sintern bis hin zur Abkühlung – lässt sich das Auftreten dieser Defekte nahezu auf null reduzieren. Dadurch erreichen Wolframlegierungskugeln die theoretische Dichte von 1 und eine perfekte Mikrostruktur.

Die Hauptursachen für Porosität und Lockerheit lassen sich auf das Rohmaterial zurückführen. Sauerstoff und Wasserdampf, die an der Oberfläche von Wolfram- und Bindemittelpulver adsorbiert sind, sowie während des Mischens eingebrachte Luft kondensieren beim Hochtemperaturesintern, sofern sie nicht vollständig entfernt werden. Aufgrund unzureichender Viskosität der flüssigen Phase oder ungenügender Verdichtung werden diese Gase jedoch im Inneren eingeschlossen und bilden nach dem Abkühlen Poren an der Oberfläche oder in oberflächennahen Bereichen. Bereiche geringer Dichte oder Pressrisse während der Formgebung bieten Raum für Gaseinschlüsse. Beim Sintern verzögert sich die Füllung dieser Bereiche mit der flüssigen Phase, was zu ungleichmäßiger Schrumpfung und der Bildung von Lockerheitszonen führt. Unkontrollierte Sinterprozessparameter sind ein Schlüsselfaktor für die Verstärkung von Defekten: Zu schnelles Erhitzen verhindert das Entweichen flüchtiger Verunreinigungen, unzureichende Wärmespeicherung führt zu einer unzureichenden Umlagerung der Wolframpartikel, und ungeeignete Abkühlraten bewirken das Erstarren und Schrumpfen der Bindemittelphase, wodurch am Wolframgerüst gezogen wird und innere Hohlräume entstehen, die bis zur Oberfläche reichen.

Verbesserungsstrategien müssen der Prävention Priorität einräumen und die Ursachen angehen. Zunächst sollte in der Rohmaterialvorbehandlung die Kombination aus Vakuum-Entgasung und Wasserstoffreduktion verstärkt werden, um den Sauerstoffgehalt des Pulvers auf ein Minimum zu reduzieren. Das Mischen sollte unter Vakuum oder inerte Atmosphäre erfolgen, um sekundäre Luftverschmutzung zu vermeiden. Beim Formgebungsprozess sollte das Kaltisostatische Pressen mit verlängerter Haltezeit priorisiert werden, um eine möglichst hohe und gleichmäßige Anfangsdichte des Grünlings ohne Rissbildung zu gewährleisten. In der Sinterphase sollte ein optimiertes thermisches Verfahren mit „langsamer Erwärmung, mehrstufiger Entgasung und präziser Flüssigphasensteuerung“ implementiert werden: In der anfänglichen Erwärmungsphase sollten mehrere Niedertemperatur-Halteplattformen eingerichtet werden, damit adsorbierte Gase und flüchtige Bestandteile langsam entweichen können; nach dem Auftreten der Flüssigphase sollte die Haltezeit

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



verlängert und der Ofen leicht vibriert werden, um das Aufsteigen und Abführen der Gase zu fördern; in der Abkühlphase sollte eine extrem langsame, kontrollierte Abkühlung eingesetzt werden, um zu vermeiden, dass beim Erstarren der Flüssigphase Unterdruck auf die inneren Poren wirkt.

Bei Rohlingen mit vorhandener Porosität und Lockerheit ist das sekundäre Heißisostatische Pressen derzeit die effektivste Methode zur Behebung dieser Mängel. Der fehlerhafte Rohling wird in eine Argonatmosphäre mit hoher Temperatur und hohem Druck eingebracht. Der Druckunterschied zwischen dem Außendruck und dem Restgas im Inneren bewirkt das Schließen der Poren, während die hohe Temperatur das Wiederfließen der Bindemittelphase fördert und so die losen Bereiche auffüllt. Dadurch werden die Defekte selbstheilend behandelt. Moderne Produktionslinien führen den Rohling nach dem Vakuumsintern sogar direkt in einen Heißisostatischen Pressofen. So wird ein Doppelprozess in einem Ofen realisiert und das Oxidationsrisiko während der Zwischenbehandlung vollständig eliminiert.

Die nachfolgenden Schleif- und Polierprozesse erfordern ebenfalls eine gezielte Optimierung. Bei Oberflächenporosität kann Diamantmikronpulver in Kombination mit ultraschallunterstütztem Schleifen Defekte beseitigen und gleichzeitig die Entstehung neuer Risse vermeiden. Bei oberflächennaher Porosität erfolgt die Entfernung stufenweise durch Kontrolle des Materialabtrags: Zunächst wird grob geschliffen, um die Defektschicht freizulegen, anschließend wird durch Feinschleifen und Polieren die Oberflächenintegrität wiederhergestellt. Abschließend werden alle Kugeln einer vollständigen Prüfung mittels hochauflösender industrieller Computertomographie oder Ultraschallmikroskopie unterzogen. Kugeln mit zu hoher Restporosität werden entweder direkt aussortiert oder erneut eingeschmolzen.

Durch einen systematischen Entwicklungsansatz, der die extremste Rohstoffreinigung, hochgradig gleichmäßige Formgebung, präzise Temperaturkontrolle beim Sintern, sekundäres heißisostatisches Pressen zur Nachbearbeitung und ein geschlossenes System zur zerstörungsfreien Prüfung umfasst, haben führende Unternehmen der Branche Oberflächenporosität und Lockerheitsfehler auf praktisch nicht nachweisbare Werte reduziert und so eine wahrhaft makellose innere Qualität für Wolframlegierungskugeln erreicht. Dieses kompromisslose Streben nach Fehlern verbessert nicht nur die Produktqualifizierungsraten und die Kundenzufriedenheit signifikant, sondern sichert Wolframlegierungskugeln auch eine unersetzliche Position in Bereichen mit strengen Anforderungen an die innere Integrität, wie beispielsweise medizinische Kollimatoren, Präzisionslager und hochwertige Gegengewichte. Es gewährleistet, dass jede Wolframlegierungskugel, die das Werk verlässt, ein mikroskopisch perfekter Kristall ist und verkörpert das unermüdliche Streben nach dem Ideal der Fehlerfreiheit in der Materialwissenschaft.

## 6.5 Verfahren zur Korrektur der Kugelform und Rundheit von Wolframlegierungen

Abweichungen von Kugelform und Rundheit außerhalb der Toleranz sind die gravierendsten geometrischen Fehler bei Wolframlegierungskugeln. Sie können direkt zu schlechtem Rollverhalten, verstärkten Vibrationen, Blockierungen in der Montage und sogar Funktionsausfällen führen. Dies gilt insbesondere für Anwendungen, die eine nahezu perfekte Kugelform erfordern, wie beispielsweise Fokussierbohrungen in medizinischen Kollimatoren, Präzisionskugellagerkugeln und hochwertige

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Uhrenrotoren . Selbst geringste Abweichungen sind inakzeptabel. Die Ursachen dieser Abweichungen liegen oft in der kumulativen Wirkung mehrerer Faktoren, darunter ungleichmäßige Formgebung, unkontrollierte Sinterungsschrumpfung, unausgewogene Schleifparameter und unzureichende thermische Spannungsentlastung. Nur durch den Aufbau einer vollständigen Kalibriertechnologiekette – von der Prävention über die Kompensation bis zur Endkontrolle – lassen sich Kugelform und Rundheit auf höchstem Präzisionsniveau stabil steuern, sodass Wolframlegierungskugeln tatsächlich als „perfekte Kugeln“ gelten können.

Ungleichmäßiger Druck während des Formprozesses ist die Hauptursache für Kugelformfehler. Beim Kaltpressen entstehen bei nicht synchronisierten Stempeln oder übermäßiger Reibung an den Formwänden lokal begrenzte Bereiche hoher und niedriger Dichte im Rohling. Beim Sinterprozess schrumpfen diese Bereiche unterschiedlich schnell und nehmen schließlich elliptische oder polyedrische Formen an. Obwohl beim isostatischen Pressen ein isotroper Druck herrscht, können Alterung der Gummiform oder unzureichende Entlüftung dennoch Mikrofallen oder Dichtegradienten verursachen. Die Vermeidung liegt in der sorgfältigen Wartung und Prozessoptimierung der Formanlagen: Kaltpressen sind mit Mehrpunkt-Synchronsensoren zur Echtzeitkorrektur ausgestattet; isostatische Presshülsen bestehen aus hochelastischen neuen Materialien und werden streng vakuumentlüftet; gleichzeitig wird nach dem Pressvorgang die gesamte Oberfläche des Rohlings lasergescannt, um ein Dichte-Geometrie-Modell zu erstellen; alle abweichenden Formen werden sofort nachbearbeitet, wodurch potenzielle Fehlerquellen beseitigt werden.

Unkontrollierte Sinterschrumpfung verstärkt die Rundheitsabweichungen am stärksten. Inhomogene Fließvorgänge der Bindemittelphase und die Umlagerung von Wolframpartikeln während des Flüssigphasensinterns führen zu unterschiedlichen Schrumpfungsraten in verschiedenen Bereichen der Kugel. Beim Abkühlen dehnt die thermische Spannung die Oberfläche zusätzlich und bildet winzige abgeflachte oder hervorstehende Stellen. Korrekturmaßnahmen in dieser Phase erfordern eine präzise Auslegung des thermischen Prozesses: Mehrsegmentige, langsame Aufheizkurven gewährleisten ein gleichmäßiges Schmelzen der Bindemittelphase; die Haltezeit ist exakt auf das optimale Umlagerungsfenster abgestimmt, kombiniert mit leichten Vibrationen oder rotierenden Tablett im Ofen, um eine symmetrische Partikelbewegung zu fördern; und eine programmierte, kontrollierte Abkühlung mit schnellem Beginn und anschließender Verlangsamung verhindert lokale Unterkühlung, die Zugspannungen erzeugt. Moderne Produktionslinien nutzen optische In-situ-Überwachungssysteme, um Veränderungen der Kugelkontur während des Hochtemperatursinterns in Echtzeit zu erfassen. Sobald eine asymmetrische Schrumpfung festgestellt wird, wird die Leistungsverteilung im Ofen sofort angepasst, um ein adaptives Sintern im geschlossenen Regelkreis zu erreichen und sicherzustellen, dass der Rohling den Ofen nahezu kugelförmig verlässt. Die Schleif- und Polierphase ist der letzte Schritt zur Korrektur von Kugelform- und Rundheitsabweichungen. Traditionelles Chargenschleifen führt aufgrund der Kollisionen der Kugeln leicht zu ungleichmäßigen Abflachungen oder facettierten Formen. Moderne Präzisionskorrekturtechnologien setzen daher vollständig auf eine Kombination aus Einzelkugel-Präzisionskontrolle und abgestufter Kompensation. Nach dem Grob- und Mittelschleifen werden die Kugeln hochpräzise automatisch sortiert und je nach ihren tatsächlichen Rundheitsabweichungen in verschiedene Kompensationskanäle geleitet. In der Feinschleifphase kommen magnetorheologische

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Polier- oder Ionenstrahl-Bearbeitungsanlagen zum Einsatz. Die Kugeln werden an einzelnen Arbeitsstationen im Vakuum adsorbiert, und das Poliermedium umhüllt die Kugeloberfläche flexibel. Dadurch wird ein isotroper Materialabtrag erreicht und lokales Über- oder Unterschleifen vollständig vermieden. Ultraschallunterstützung und Echtzeit-Rückmeldung durch Online-Lasermessung gewährleisten, dass die Abtragsmenge jeder Kugel bis in den Submikrometerbereich genau bestimmt wird. Für fertige Kugeln, die die Toleranzen überschreiten, hat die Industrie verschiedene Nachbearbeitungsverfahren entwickelt: Chemisch-mechanisches Polieren in Kombination mit selektivem Ätzen entfernt gezielt hervorstehende Bereiche; Heißisostatisches Pressen mit anschließendem Feinschleifen schließt innere Mikroporen und rundet die Form ab; modernste Laser-Umschmelzverfahren können sogar kleinste Abflachungen durch lokales Schmelzen und Wiedererstarren reparieren, ohne die Gesamtabmessungen zu verändern. Alle korrigierten Kugeln werden mit einem Mehrstationen-Rundheitsmessgerät und einer Koordinatenmessmaschine geprüft. Die Daten zu Kugelform und Rundheit werden in Echtzeit in die Datenbank eingegeben und mit den Formgebungs- und Sinterprotokollen verknüpft, um einen geschlossenen Prozesskreislauf zu bilden.

Durch die zuvor erwähnte systematische Kalibrierungstechnologie, die Prävention priorisiert, durch Kompensation ergänzt und ein geschlossenes Detektionssystem etabliert, hat sich die Kugelform und Rundheit von Wolframlegierungskugeln von einem anfänglich schwer zu kontrollierenden Engpass zu einer konstant erreichten Präzision entwickelt. Dies gewährleistet, dass jede Kugel, die das Werk verlässt, einer mathematisch perfekten Kugel extrem nahe kommt und somit nicht nur die anspruchsvollsten Walz- und Montageanforderungen erfüllt, sondern auch die zuverlässigste geometrische Garantie für scharfe Fokussierung in der medizinischen Bildgebung, höchste Stabilität in Präzisionsinstrumenten und den zuverlässigen Betrieb von High-End-Geräten bietet. Das Streben nach maximaler Kugelform und Rundheit ist seit Langem der höchste Ausdruck der Fertigungstechnologie für Wolframlegierungskugeln und festigt deren unangefochtene Position im Bereich der Präzisionsfertigung.

## **6.6 Verfahren zur Kontrolle der Härte von Wolframlegierungskugeln, die zu niedrig oder zu hoch ist**

Übermäßige oder unzureichende Härte ist das typischste und am besten steuerbare Qualitätsproblem bei der Schwankung der mechanischen Eigenschaften von Wolframlegierungskugeln. Erstere führt zu unzureichender Verschleißfestigkeit und vorzeitigem Ausfall, während letztere Sprödbbruch oder Verarbeitungsschwierigkeiten verursachen kann. Die Härtekontrolle ist keine nachträgliche Maßnahme, sondern ein systematischer Prozess, der sich durch den gesamten Herstellungsprozess zieht – von der Zusammensetzungsentwicklung über den Sinterprozess und die Wärmebehandlung bis hin zum Schleifen. Nur durch die Beherrschung der zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten und die Anwendung eines mehrdimensionalen, synergistischen Ansatzes lässt sich die Härte stabil im Zielbereich halten und so ein optimales Leistungsgleichgewicht und eine hohe Chargenkonsistenz erreichen.

Die Hauptursache für geringe Härte ist meist eine unzureichende Bindung des Wolframpartikelgerüsts oder eine zu weiche Bindemittelphase. Ein niedriger Wolframgehalt, eine zu geringe Sintertemperatur oder eine zu kurze Haltezeit führen zu unzureichendem Halswachstum der Wolframpartikel, was eine

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

schwache Bindung zwischen den Partikeln und eine makroskopische Abnahme der Gesamthärte zur Folge hat. Ein zu hoher Anteil an Bindemittelphase oder die Verwendung eines kupferbasierten Systems mit zu hoher Duktilität verringern ebenfalls den Härtebeitrag des Wolframs, wodurch die Kugeln unter Reibung oder Stoß schnell verschleifen. Auch das Fehlen von Spurenadditiven ist ein häufiges Problem; ohne verstärkende Elemente wie Kobalt und Molybdän kann die Bindemittelphase nicht effektiv aushärten und die Härte verringern.

Der erste Schritt zur Verbesserung der Härte ist die Optimierung der Zusammensetzung. Durch eine angemessene Erhöhung des Wolframgehalts oder die Zugabe von hochschmelzenden Elementen wie Kobalt, Molybdän und Rhenium lässt sich die Grenzfläche zwischen Wolframpartikeln und Bindemittelphase deutlich verstärken und gleichzeitig die Festigkeit der Bindemittelphase selbst erhöhen. Eine Verlängerung der Hochtemperatur-Haltezeit oder eine stufenweise Erwärmung während des Sinterprozesses fördert die vollständige Auflösung und Wiederausfällung der Wolframpartikel und führt so zu größeren und runderen Verbindungsstellen. Eine anschließende Vakuum- oder Wasserstoff-Sekundärsinterung kann zudem restliche Sauerstoffeinschlüsse entfernen, die Grenzfläche reinigen und die Haftfestigkeit verbessern. Die Wärmebehandlung ist die letzte Option für Kugeln mit geringer Härte. Langzeitiges Glühen bei niedrigen Temperaturen fördert die Diffusion der Bindemittelphase zu den Wolframpartikeln und bildet so eine Übergangshärtungsschicht. Eine Alterungsbehandlung unter kontrollierter Atmosphäre führt zur Ausfällung fein verteilter Phasen und erhöht die Gesamthärte weiter. Der Einsatz härterer Diamantschleifmittel und höherer Druck beim Schleifen erzeugt zudem eine Kaltverfestigungsschicht an der Oberfläche und kompensiert so die unzureichende Härte des Grundmaterials.

Die übermäßige Härte ist häufig auf Überverfestigung oder Spannungsakkumulation zurückzuführen. Ein zu hoher Wolframgehalt, eine zu hohe Sintertemperatur oder eine zu schnelle Abkühlung können zu einem abnormalen Wachstum der Wolframpartikel und zur Ausbildung einer verarmten Binderphase führen. Dies hat einen sprunghaften Anstieg der makroskopischen Härte und eine starke Zunahme der Sprödigkeit zur Folge. Auch zu viele Spurenadditive oder eine unsachgemäße Wärmebehandlung können zu einer übermäßigen Bildung spröder Phasen führen, wodurch die Kugeln unter Stoßbelastung bruchgefährdet werden.

Der Schlüssel zur Reduzierung übermäßiger Härte liegt in der „Erweichung“ und „Entspannung“. Auf der Ebene der Zusammensetzung kann der Anteil der Binderphase entsprechend erhöht oder ein Nickel-Kupfer-System mit besserer Duktilität gewählt werden, um den härtenden Beitrag von Wolfram zu verdünnen. Beim Sintern sollte die Spitzentemperatur gesenkt oder die Verweilzeit in der flüssigen Phase verlängert und anschließend langsam abgekühlt werden, um die Wolframpartikel auf einer geeigneten Größe zu halten und übermäßige innere Spannungen zu vermeiden. In der Wärmebehandlungsphase sollten Hochtemperatur-Vakuumlühen oder mehrfaches zyklisches Glühen eingesetzt werden, um den Abbau von Eigenspannungen und die Homogenisierung der Binderphase zu fördern und gleichzeitig die Ausscheidung spröder Phasen zu hemmen. Beim Schleifen und Polieren sollten die abgetragene Materialmenge und der Druck minimiert werden, um die Bildung einer überhärteten Oberflächenschicht zu vermeiden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Bei fertigen Kugeln mit bereits übermäßig hoher Härte sind chemische Oberflächenbehandlung oder Ionenimplantation wirksame Methoden. Erstere löst die hervorstehenden Wolframpartikel an der Oberfläche selektiv durch Steuerung der Ätzlösung auf, während letztere die Oberflächenkristallstruktur durch Einbringen inerte Elemente anpasst, um einen graduellen Härtegradienten zu erzielen. Nach Abschluss aller Kontrollmaßnahmen müssen eine Mehrpunkt-Vickers-Härteprüfung und eine Kerbschlagzähigkeitsprüfung durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die Härte wieder im Zielbereich liegt und keine Sprödigkeitsgefahr besteht.

Die präzise Kontrolle der Härte – ob zu niedrig oder zu hoch – beweist die Raffinesse und Flexibilität der Herstellung von Wolframlegierungskugeln. Es geht nicht einfach um Härteerhöhung oder -reduzierung, sondern vielmehr um die optimale Balance zwischen Härte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit durch ein systematisches Zusammenspiel von Zusammensetzung, Prozess und Behandlung. Diese Kontrollierbarkeit ermöglicht es, dass Wolframlegierungskugeln gleichzeitig vielfältige Anforderungen erfüllen, wie beispielsweise die extreme Verschleißfestigkeit von Vibrationssieben, die Kratzfestigkeit von medizinischen Kollimatoren, die Dauerfestigkeit von Präzisionslagern und die Verformungsbeständigkeit von hochwertigen Gegengewichten. Sie ermöglicht zudem den effizienten Wechsel zwischen Produkten mit unterschiedlichen Härtegraden auf derselben Produktionslinie und verbessert so die Produktionsflexibilität und Marktreaktionsfähigkeit erheblich. Sie ist nicht nur die Lösung von Qualitätsproblemen, sondern auch ein entscheidender Faktor für kundenspezifische Eigenschaften und vielfältige Funktionen von Wolframlegierungskugeln.

## 6.7 Untersuchung und Verbesserung von inneren Einschlussdefekten in Wolframlegierungskugeln

### Analyse der Ursachen von Einschlussdefekten in Wolframlegierungskugeln

Die Herstellung von Wolframlegierungskugeln ist ein komplexer Prozess, der von zahlreichen Faktoren abhängt, darunter Rohstoffe, Produktionsprozesse und Umgebungsbedingungen. Zunächst sind Reinheit und Qualität der Rohstoffe grundlegend für die Eigenschaften des Endprodukts. Enthält Wolframpulver oder andere Legierungselemente Spuren von Verunreinigungen oder werden sie während Lagerung und Transport kontaminiert, können sich diese Fremdstoffe bei der Weiterverarbeitung in die Matrix einlagern und Einschlüsse bilden. Beispielsweise können nichtmetallische Verunreinigungen wie Oxide oder Silikate aufgrund chemischer Reaktionen während des Schmelzprozesses zurückbleiben, während metallische Verunreinigungen durch Verschleiß der Anlagen oder Kreuzkontamination entstehen können. Darüber hinaus kann eine ungleichmäßige Partikelgrößenverteilung oder Agglomeration des Pulvers die lokale Entmischung von Komponenten verstärken und so einen Nährboden für Defekte schaffen.

Zweitens ist eine unzureichende Parameterkontrolle im Produktionsprozess ein weiterer wichtiger Faktor für Einschlussdefekte. Wird das Pulver während des Mischens und Pressens nicht ausreichend und gleichmäßig vermischt oder sind Pressdruck und -geschwindigkeit nicht aufeinander abgestimmt, können lokale Dichteunterschiede auftreten, die zu mikroskopischen Hohlräumen oder Ansammlungen von Fremdstoffen führen. Besonders während des Sinterprozesses ist die Kontrolle von Temperatur, Zeit und Atmosphäre entscheidend. Zu hohe Sintertemperaturen können zur Verflüchtigung von Elementen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oder zu anomalen Phasenumwandlungen führen, während zu niedrige Temperaturen die Porosität nicht vollständig beseitigen können. Gleichzeitig können Spuren von Sauerstoff oder Feuchtigkeit in der Schutzatmosphäre mit Legierungselementen reagieren und Oxideinschlüsse bilden. Darüber hinaus können ungleichmäßige Abkühlgeschwindigkeiten innere Spannungen hervorrufen und die Ansammlung von Verunreinigungen an den Korngrenzen begünstigen.

Umweltfaktoren spielen eine ebenso wichtige Rolle. Entspricht die Sauberkeit am Produktionsstandort nicht den Standards, können Staub, Öl oder andere Schwebstoffe aus der Luft an der Oberfläche von Rohstoffen oder Halbfertigprodukten haften bleiben und schließlich im Produkt eingeschlossen werden. Unzureichende Anlagenwartung, wie beispielsweise Werkzeugverschleiß oder Schmierstoffrückstände, kann ebenfalls zu externen Verunreinigungen führen. Insbesondere menschliches Versagen, wie die Nichteinhaltung von Prozessvorgaben oder Reinigungsverfahren, kann indirekt zur Ansammlung von Schadstoffen beitragen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ursachen für Einschlussfehler sowohl in den Materialeigenschaften selbst als auch in äußeren Einflüssen aus dem Prozess und der Umgebung liegen; eine systematische Analyse ist notwendig, um die Fehlerquelle genau zu ermitteln.

### Methoden und Techniken zur Erkennung von Einschlussdefekten

Zur Erkennung von Einschlussdefekten in Wolframlegierungskugeln hat die moderne Industrie verschiedene zerstörungsfreie und zerstörende Prüfverfahren entwickelt, die jeweils spezifische Anwendungsbereiche und Grenzen aufweisen. Die zerstörungsfreie Prüfung hat sich aufgrund ihrer hohen Effizienz und der zerstörungsfreien Eigenschaften als Standardverfahren etabliert. Ultraschallprüfung und Röntgenprüfung sind hierbei besonders weit verbreitet. Die Ultraschallprüfung nutzt die Ausbreitungseigenschaften hochfrequenter Schallwellen in Materialien. Treffen Schallwellen auf Grenzflächen wie Einschlüsse, werden sie reflektiert oder gestreut. Größe und Lage der Defekte lassen sich durch Analyse der Echosignale bestimmen. Dieses Verfahren ist empfindlich gegenüber mikroskopischen Poren und eingebetteten Fremdkörpern und ermöglicht automatisiertes Scannen. Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, ist jedoch eine gute Ankopplung zwischen Prüfkopf und Kugeloberfläche erforderlich. Die Röntgenprüfung hingegen basiert auf der unterschiedlichen Absorption von Röntgen- oder Gammastrahlen durch verschiedene Materialien. Sie erzeugt zwei- oder dreidimensionale Bilder der inneren Struktur, die Morphologie und Verteilung der Einschlüsse anschaulich darstellen. Allerdings erfordert diese Methode eine hohe Gerätepräzision und kann durch die Dicke und Dichte der Probe beeinflusst werden, weshalb eine Optimierung des Algorithmus zur Verbesserung der Auflösung erforderlich ist.

Neben den oben genannten Methoden werden auch Wirbelstromprüfung und Magnetpulverprüfung häufig zur Erkennung von Oberflächen- oder oberflächennahen Defekten eingesetzt. Die Wirbelstromprüfung basiert auf dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion und reagiert empfindlich auf Diskontinuitäten in leitfähigen Materialien, wodurch sie sich für ein schnelles Screening eignet. Die Magnetpulverprüfung deckt Defekte in ferromagnetischen Materialien durch die Magnetfeldverteilung auf, ist jedoch auf bestimmte Legierungszusammensetzungen beschränkt. Darüber hinaus ermöglichen neue Technologien wie die Computertomographie (CT) eine hochpräzise dreidimensionale

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rekonstruktion und liefern so eine dreidimensionale Darstellung der räumlichen Struktur von Einschlüssen sowie Daten für die quantitative Analyse. Allerdings sind die Kosten hoch und die Prüfgeschwindigkeit gering, was ihren Einsatz auf Laborarbeiten oder Stichproben kritischer Bauteile beschränkt.

Obwohl zerstörende Prüfverfahren Proben beschädigen, liefern sie detailliertere mikroskopische Informationen. Die metallografische Analyse präpariert Proben durch Schneiden, Polieren und Ätzen und ermöglicht so die mikroskopische Untersuchung von Morphologie, Zusammensetzung und Bindungszustand von Einschlüssen in die Matrix. Dies hilft, die Ursache von Defekten zu ermitteln. Rasterelektronenmikroskopie in Kombination mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) kann die Elementzusammensetzung von Einschlüssen weiter bestimmen und zwischen endogenen und exogenen Quellen unterscheiden. Gleichzeitig können mechanische Prüfungen wie Härte- oder Zugversuche indirekt den Einfluss von Defekten auf die Gesamtleistung bewerten und so eine Grundlage für Prozessverbesserungen schaffen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Auswahl der Prüfmethoden ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Effizienz, Genauigkeit und Kosten erfordert. Die Entwicklung einer mehrstufigen Screening-Strategie, die auf den tatsächlichen Produktionsbedingungen basiert, gewährleistet die umfassende und zuverlässige Fehleridentifizierung.

### **Maßnahmen zur Verbesserung des Produktionsprozesses**

Um Einschlussdefekte in Wolframlegierungskugeln effektiv zu reduzieren, sind in jeder Phase des Produktionsprozesses sorgfältige Kontrolle und technologische Innovation erforderlich. Zunächst muss in der Rohmaterialverarbeitung die Pulverqualität streng kontrolliert werden. Hierfür sind hochreines Wolframpulver und Legierungselemente zu verwenden. Die Partikelgrößenverteilung sollte durch Sieben und Luftstromklassierung optimiert werden. Vorbehandlungsverfahren wie Vakuumentgasung oder chemische Reinigung können den Verunreinigungsgehalt weiter senken. Gleichzeitig müssen Lager- und Transportumgebungen trocken und sauber gehalten werden, um Kreuzkontaminationen zu vermeiden. Der Einsatz von verschlossenen Behältern und automatisierten Fördersystemen minimiert die Risiken menschlicher Eingriffe.

Die Optimierung der Misch- und Pressprozesse ist entscheidend. Der Einsatz von Hochenergie-Kugelmøhlen oder mechanischen Legierungsverfahren fördert eine gleichmäßige Pulvermischung und beugt potenziellen Agglomeraten vor. Beim Pressvorgang werden optimaler Druck und optimale Haltezeit mittels Simulationsanalyse ermittelt, um eine gleichbleibende Grünlingdichte zu gewährleisten. Isostatisches Pressen anstelle von unidirektionalem Pressen reduziert effektiv Dichtegradienten und Kantenfehler. Die Werkzeugkonstruktion muss zudem rheologische Eigenschaften berücksichtigen, um die Bildung von Mikrorissen in Spannungskonzentrationsbereichen zu verhindern. Darüber hinaus ermöglicht ein Online-Überwachungssystem die Echtzeit-Rückmeldung von Druck- und Wegdaten, was eine rechtzeitige Parameteranpassung und die Vermeidung chargenbedingter Probleme ermöglicht.

Ein zentraler Schritt bei der Sinteroptimierung ist die Kontrolle des Temperaturprofils und der Atmosphäre. Es wird eine segmentierte Sinterstrategie angewendet: Zunächst wird bei niedriger

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

Temperatur das Bindemittel entfernt, anschließend wird die Temperatur schrittweise bis zur Maximaltemperatur erhöht, um eine vollständige Diffusion der Legierungselemente ohne übermäßige Verflüchtigung zu gewährleisten. Die Sinteratmosphäre sollte aus hochreinem Wasserstoff oder einem Vakuum bestehen. Gasreinigungsanlagen entfernen Spuren von Sauerstoff und Wasserdampf. Während der Abkühlphase ist eine kontrollierte Kühlung, beispielsweise durch Gradientenkühlung oder Schutzgasatmosphäre, erforderlich, um thermisch spannungsbedingte Sekundäreinschlüsse zu vermeiden. Nachbearbeitungstechniken wie Heißisostatisches Pressen (HIP) schließen die Restporosität und verbessern die Verdichtung. Oberflächenpolieren und Reinigen entfernen anhaftende Verunreinigungen und gewährleisten so ein Produkt ohne Fremdkörper. Durch diese umfassenden Maßnahmen lässt sich nicht nur die Fehlerrate deutlich reduzieren, sondern auch die Produktkonsistenz und die Gebrauchseigenschaften verbessern.

### **Verbesserung des Qualitätsmanagementsystems**

Die Etablierung eines umfassenden Qualitätsmanagementsystems ist ein langfristiger Mechanismus zur Vermeidung und Kontrolle von inneren Einschlüssen in Wolframlegierungskugeln. Dieses System sollte den gesamten Lebenszyklus von der Entwicklung bis zur Auslieferung abdecken und die Prinzipien der Prävention und der kontinuierlichen Verbesserung betonen. Zunächst müssen in der Entwicklungsphase Qualitätsziele und Risikopunkte klar definiert werden. Potenzielle Fehlerquellen sind mittels Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) zu identifizieren und entsprechende Kontrollpläne zu entwickeln. Beispielsweise sollten strenge Eingangskriterien und regelmäßige Audits für Rohstofflieferanten eingeführt werden, um sicherzustellen, dass die gelieferten Pulver die Anforderungen an chemische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften erfüllen. Gleichzeitig sollten Methoden der statistischen Prozesskontrolle (SPC) eingeführt werden, um wichtige Prozessparameter wie Sintertemperatur und -druck in Echtzeit zu überwachen und Abweichungen frühzeitig zu erkennen und zu korrigieren.

Die Kontrolle während des Produktionsprozesses basiert auf standardisierten Arbeitsanweisungen (SOPs) und Automatisierungstechnik. Die Bediener sollten systematisch geschult werden und die Bedienung und Reinigung der Anlagen beherrschen, um menschliche Fehler zu minimieren. In jeder Prozessphase sollten Prüfstellen eingerichtet werden, die Stichproben und vollständige Prüfungen kombinieren, um sicherzustellen, dass die Halbfertigprodukte den Qualitätsstandards entsprechen. Die Prüfdaten werden mithilfe eines Informationssystems erfasst und analysiert, um Qualitätsberichte zu erstellen und die Fehlerursache zu ermitteln. Wird beispielsweise eine ungewöhnlich hohe Fehlerquote in einer Produktcharge festgestellt, kann die Datenrückverfolgung die betroffene Anlage oder Schicht identifizieren und so gezielte Verbesserungen ermöglichen.

Darüber hinaus bildet ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess das Herzstück eines Qualitätsmanagementsystems. Regelmäßige interne Audits und Managementbewertungen dienen der Beurteilung der Systemeffektivität und der Aktualisierung der Standards auf Basis branchenüblicher Best Practices. Kundenfeedback und Marktbeschwerden sollten ebenfalls in die Analyse einbezogen werden. Mithilfe der Ursachenanalyse (RCA) lassen sich systemische Probleme identifizieren und technologische

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



Innovationen vorantreiben. Zusammenarbeit und Austausch sind ebenso wichtig; der Erfahrungsaustausch mit Forschungseinrichtungen oder Branchenverbänden kann die Anwendung neuer Methoden beschleunigen. Letztendlich lassen sich durch die Integration des Qualitätsmanagements in die Unternehmenskultur und die Förderung einer Null-Fehler-Mentalität bei jedem Mitarbeiter die Zuverlässigkeit und Wettbewerbsfähigkeit der Produkte grundlegend verbessern.

## **6.8 Behandlung von Absplitterungen und Ausbrüchen beim Schleifen und Polieren von Wolframlegierungskugeln**

### **Art und Auswirkungen von Kantenausbrüchen und Abplatzungen während des Schleif- und Polierprozesses**

Bei der Präzisionsbearbeitung von Wolframlegierungskugeln bestimmt das Schleifen und Polieren als letzter kritischer Prozess maßgeblich die Oberflächenbeschaffenheit und die Leistungsfähigkeit des Produkts. Absplitterungen und Abplatzungen sind typische Sprödbrucherscheinungen des Materials unter mechanischer Belastung und äußern sich hauptsächlich in Materialablösung und -verlust an den Kanten oder in lokalisierten Bereichen der Kugeloberfläche. Dieser Defekt beeinträchtigt nicht nur das Erscheinungsbild des Produkts, sondern auch dessen Funktionseigenschaften erheblich. Mikroskopisch betrachtet entstehen Absplitterungen und Abplatzungen durch Spannungskonzentrationen im Material in Kombination mit äußeren Belastungen. Überschreitet die lokale Spannung die Bruchfestigkeit des Materials, breiten sich Mikrorisse aus und dringen ein, was schließlich zum makroskopischen Materialversagen führt.

Diese Defekte haben vielfältige Auswirkungen auf die Produktleistung. Erstens beeinträchtigen Absplitterungen und Abplatzungen die geometrische Genauigkeit und Maßhaltigkeit der Kugel, was zu ungleichmäßigen Passungen und Abweichungen in den Bewegungsbahnen bei der Präzisionsmontage führt. Zweitens werden fehlerhafte Bereiche zu Spannungskonzentrationspunkten, die die Entstehung und Ausbreitung von Ermüdungsrissen unter zyklischer Belastung beschleunigen und die Produktlebensdauer erheblich reduzieren. Darüber hinaus können Oberflächenfehler bei Hochgeschwindigkeitsbewegungen Vibrationen und Geräusche erzeugen und die Betriebsstabilität des Gesamtsystems beeinträchtigen. Insgesamt betrachtet erhöhen Absplitterungen und Abplatzungen auch die nachfolgenden Reparaturkosten, verschwenden Rohstoffe und Energie und wirken sich negativ auf die Produktionseffizienz und die nachhaltige Entwicklung aus.

Es ist wichtig zu beachten, dass Wolframlegierungen als hochdichte und hochharte Werkstoffe bei der Bearbeitung eine ausgeprägtere Neigung zu Sprödb Brüchen aufweisen. Um das Problem grundlegend zu verstehen, ist daher ein tiefes Verständnis des mechanischen Verhaltens und der Schädigungsmechanismen des Materials beim Schleifen und Polieren unerlässlich. Darüber hinaus treten Kantensplitterungen und -abplatzungen häufig nicht isoliert auf; sie können eng mit potenziellen Defekten aus vorangegangenen Prozessen zusammenhängen, wie beispielsweise innerer Porosität aufgrund unzureichenden Sinterns oder Eigenspannungen infolge unsachgemäßer Wärmebehandlung. Die Lösung dieses Problems erfordert daher einen systematischen Ansatz, der den Schleif- und

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

Polierprozess in die gesamte Fertigungskette einbezieht .

### Analyse der Hauptursachen von Kantenabsplitterungen und Abplatzungen

Abplatzungen und Ausbrüche entstehen durch das komplexe Zusammenspiel mehrerer Faktoren und erfordern eine eingehende Analyse verschiedener Dimensionen wie Materialeigenschaften, Prozessparameter und Anlagenzustand. Die inhärenten Eigenschaften des Materials selbst bestimmen maßgeblich seine Beständigkeit gegen Abplatzungen. Die Mikrostruktur von Wolframlegierungen, einschließlich Korngröße, Phasenverteilung und Grenzflächenhaftung, beeinflusst direkt ihre Bruchzähigkeit. Bei groben Körnern oder Entmischung bilden Korngrenzen leicht den Ausgangspunkt für Risse. Gleichzeitig ist der Eigenspannungszustand im Material entscheidend. Führt eine unsachgemäße Vorbehandlung zu übermäßigen Zugspannungen an der Oberfläche, kann die Überlagerung von äußerer und innerer Belastung beim Schleifen und Polieren leicht zu Sprödbrüchen führen.

Falsche Prozessparameter sind eine direkte Ursache für Defekte. Der Schleifdruck ist einer der kritischsten Faktoren: Zu hoher Druck führt dazu, dass einzelne Schleifkörner zu tief eindringen, was erhebliche plastische Verformung und Rissbildung zur Folge hat. Zu niedriger Druck hingegen kann dazu führen, dass die Schleifkörner auf der Oberfläche gleiten, anstatt zu schneiden, wodurch zusätzliche thermische Spannungen und Oberflächenschäden entstehen. Auch die Schleifgeschwindigkeit muss präzise gesteuert werden. Die durch hohe Drehzahlen erzeugte Zentrifugalkraft kann bei spröden Werkstoffen zu Kantenbrüchen führen, während eine zu niedrige Drehzahl die Bearbeitungseffizienz und die Oberflächengleichmäßigkeit beeinträchtigt. Kühl- und Schmierbedingungen haben einen signifikanten Einfluss auf die Defektbildung. Unzureichende Kühlung kann zu übermäßig hohen lokalen Temperaturen führen und die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs verändern, während ungenügende Schmierung den Reibungskoeffizienten zwischen den Schleifkörnern und dem Werkstück erhöht und so die Spannungskonzentration verstärkt.

Ausrüstung und Schleifscheibenmerkmale sind gleichermaßen wichtig. Die Planheit und die dynamische Auswuchtung der Schleifscheibe beeinflussen direkt die Gleichmäßigkeit der Spannungsverteilung; selbst geringste Vibrationen erzeugen Stoßbelastungen auf der Kugeloberfläche. Die Eigenschaften der Schleifscheibe, einschließlich Schleifmittelart, Korngröße, Bindungsstärke und Porenstruktur, bestimmen die Intensität des Zerspanungsprozesses. Zu harte oder zu weiche Schleifscheiben können Probleme verursachen: Zu harte Schleifscheiben bieten nicht die notwendige elastische Dämpfung und verursachen leicht Kantenausbrüche; zu weiche Schleifscheiben können durch vorzeitigen Schleifkomverlust ihre Schneidleistung einbüßen, was zu Prozessinstabilität führt. Darüber hinaus können durch ungeeignete Vorrichtungskonstruktion verursachte Spannungen und durch unzureichende Umgebungsbedingungen eingebrachte harte Partikel zu Kantenausbrüchen und -abplatzungen beitragen.

Im Kern sind diese Probleme oft auf systemische Mängel in der Prozesssteuerung zurückzuführen. Ein unzureichendes Verständnis der Materialabtragsmechanismen führt dazu, dass die Parameterwahl

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

empirisch erfolgt ; fehlende Prozessüberwachungsmethoden verhindern die rechtzeitige Erkennung und Behebung von Problemen; ungenügende Prozesskoordination, wie beispielsweise die ineffektive Behandlung von Oberflächenschäden oder Graten aus vorherigen Bearbeitungsschritten, erhöht das Risiko von Kantenausbrüchen beim nachfolgenden Polieren. Daher muss die Lösung der Probleme von Kantenausbrüchen und Abplatzungen auf einem umfassenden Verständnis der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Faktoren und der Anwendung systematischer Verbesserungsstrategien basieren.

### **Optimierungs- und Kontrollstrategien für Schleif- und Polierprozessparameter**

Um Absplitterungen und Ausbrüche beim Schleifen und Polieren von Wolframlegierungskugeln zu vermeiden , ist eine Optimierung der Prozessparameter auf Basis wissenschaftlicher Analysen und systematischer Experimente erforderlich. Zunächst sollte die Steuerung des Schleifdrucks einem stufenweisen Prinzip folgen, um durch mehrstufige Druckeinstellungen einen gleichmäßigen Materialabtrag zu erzielen. In der ersten Stufe wird mit niedrigerem Druck grob geschliffen, um makroskopische Inhomogenitäten aus vorherigen Bearbeitungsschritten zu beseitigen. In der zweiten Stufe wird der Druck schrittweise erhöht, um einen effektiven Materialabtrag und eine Formkorrektur zu erreichen. In der dritten Stufe wird mit feinem Druck die Oberflächenbearbeitung abgeschlossen. Diese stufenweise Vorgehensweise vermeidet plötzliche Spannungsänderungen und reduziert Stoßbelastungen an den Kanten. Gleichzeitig erfordert die Druckregelung ein fortschrittliches Servoregelungssystem, das Echtzeit-Feedback und adaptive Anpassung ermöglicht und so die Stabilität des Prozesses gewährleistet.

Die Optimierung der Schleifgeschwindigkeit erfordert die Berücksichtigung des Gleichgewichts zwischen Zentrifugalkraft und Schnittwärme. Der Einsatz von Bearbeitungsstrategien mit variabler Drehzahl ermöglicht eine effektive Kontrolle der Wärmeentwicklung und der mechanischen Belastung; beispielsweise durch Reduzierung der Drehzahl in kantenempfindlichen Bereichen bei gleichzeitig hoher Effizienz in planaren Bereichen. Das optimale Verhältnis zwischen Drehzahl und Anpressdruck ist besonders wichtig und erfordert die Festlegung von Parameterbereichen durch systematische Prozessversuche, um das optimale Verhältnis zwischen Abtragsrate und Oberflächenqualität zu gewährleisten. Moderne CNC-Systeme ermöglichen die Programmierung komplexer Bewegungsabläufe und Drehzahlkurven und bieten damit eine technologische Grundlage für die Optimierung der Bearbeitungsdynamik.

Die Verbesserung des Kühl- und Schmiersystems ist entscheidend, um Schneidkantenausbrüche zu vermeiden. Es ist unerlässlich, nicht nur ausreichend Durchfluss und Druck sicherzustellen, sondern auch die Durchlässigkeit und Wärmeaustauscheffizienz des Kühlmediums zu berücksichtigen. Der Einsatz eines speziellen Schneidöls anstelle eines herkömmlichen Kühlmittels kann die Schmierbedingungen deutlich verbessern und den Reibungskoeffizienten zwischen Schleifkörnern und Werkstück reduzieren. Position und Winkel der Kühlmitteldüsen müssen sorgfältig ausgelegt werden, um die Bildung eines stabilen Kühlfilms am Kontaktpunkt zwischen Schleifkörnern und Werkstück zu gewährleisten. Darüber hinaus ist die Kühlmitteltemperaturregelung von größter Bedeutung; die Aufrechterhaltung einer stabilen Temperatur durch ein Thermostatsystem verhindert Maßabweichungen und Spannungsänderungen

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

aufgrund von Wärmeausdehnung und -kontraktion. Die Einrichtung von Prozessüberwachungs- und Feedbackmechanismen ist entscheidend für eine präzise Parametersteuerung. Online-Überwachungssysteme erfassen Signale wie Vibrationen, Temperatur und Schallemissionen in Echtzeit und identifizieren Prozessanomalien durch Merkmalsanalyse. Wird beispielsweise ein Anstieg einer bestimmten Frequenzkomponente der Vibration festgestellt, kann das System die Drehzahl oder den Druck automatisch anpassen, um Defekte zu vermeiden. Visuelle Inspektionsgeräte überwachen den Zustand der Kugelkanten und erkennen frühzeitig erste Anzeichen von Kantenausbrüchen. Die Korrelationsanalyse zwischen diesen Überwachungsdaten und den Prozessparametern bildet die wissenschaftliche Grundlage für die kontinuierliche Optimierung. Durch den Aufbau einer Prozessparameterdatenbank und eines Expertensystems lässt sich Erfahrungswissen in wiederverwendbare digitale Assets umwandeln und so die Intelligenz des Produktionssystems insgesamt steigern.

### **Anwendungsforschung für fortschrittliche Schleif- und Poliertechnologien und -geräte**

Mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Fertigungstechnologie sind eine Reihe fortschrittlicher Schleif- und Polierverfahren entstanden, die neue Lösungen für das Problem des Kantenausbrechens und Abplatzens von Wolframlegierungskugeln bieten. Die magnetorheologische Poliertechnologie ermöglicht einen flexiblen Materialabtrag durch Anpassung der Viskosität des Poliermittels mittels Steuerung der Magnetfeldstärke. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt im weichen Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück, der zu einer gleichmäßigen Spannungsverteilung führt und es besonders geeignet für die Präzisionsbearbeitung kantenempfindlicher Bereiche macht. Die computergesteuerte Magnetfeldverteilung ermöglicht die präzise Steuerung des Materialabtrags in verschiedenen Bereichen und vermeidet so effektiv die mit herkömmlichen, starren Schleifmitteln verbundenen Stoßrisiken. Darüber hinaus zeichnet sich diese Technologie durch eine hohe Anpassungsfähigkeit aus, indem sie die Richtung der Polierkraft automatisch an die Krümmung der Kugel anpasst, um eine gleichmäßige Oberflächengüte zu gewährleisten.

Das chemisch-mechanische Polieren (CMP), ein hybrides Bearbeitungsverfahren, kombiniert die Synergieeffekte von chemischem Ätzen und mechanischem Schleifen. Bei der Bearbeitung von Wolframlegierungskugeln kann durch die Auswahl geeigneter Oxidationsmittel und Komplexbildner eine leicht entfernbare, weiche Schicht auf der Kugeloberfläche erzeugt werden, die anschließend durch leichte mechanische Einwirkung abgetragen wird. Dieses Verfahren reduziert die für die Bearbeitung erforderliche mechanische Belastung erheblich und minimiert somit das Risiko von Kantenausbrüchen und Abplatzungen. Die Schlüsseltechnologien liegen im präzisen Verhältnis von chemischen Reagenzien zu Schleifkörnern sowie in der Abstimmung und Kontrolle von Reaktions- und Abtragsraten. Die Online-pH-Wert- und Potenzialüberwachung ermöglicht die Echtzeit-Anpassung der chemischen Umgebung und gewährleistet so die Prozessstabilität.

Die ultraschallunterstützte Schleiftechnologie integriert hochfrequente Vibrationen in den traditionellen Bearbeitungsprozess und reduziert so die effektive Schleifkraft durch axiale Vibration der Schleifscheibe. Die Ultraschallvibration verändert die Wechselwirkung zwischen Schleifkom und Werkstück und

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



wandelt den kontinuierlichen Schnitt in einen pulsierenden Abtrag um. Dies reduziert nicht nur die durchschnittliche Schnittkraft, sondern fördert auch die zeitgerechte Spanabfuhr. Bei schwer zerspanbaren Werkstoffen wie Wolframlegierungen kann die Ultraschallunterstützung die Rissausbreitung wirksam unterdrücken und die Oberflächengüte verbessern. Kern des Anlagensystems ist die Konstruktion des Ultraschallgenerators und des Werkzeugkopfes, die eine präzise Steuerung von Vibrationsfrequenz und -amplitude sowie eine optimale Abstimmung mit der Hauptbewegung erfordert.

Moderne Schleif- und Poliermaschinen entwickeln sich zunehmend in Richtung intelligenter und integrierter Systeme. Mehrachsige CNC-Systeme mit Gelenkverbindungen ermöglichen die Planung komplexer Bewegungsabläufe und vermeiden lokale Spannungsspitzen, die durch wiederholtes Schleifen in einer Richtung entstehen. Der Einsatz aktiver Auswuchttechnik unterdrückt effektiv Unwuchtschwingungen rotierender Teile und schafft so ein stabiles dynamisches Umfeld für die Präzisionsbearbeitung. Innovative Spannsysteme sind ebenfalls hervorzuheben; beispielsweise reduziert die Verwendung elastischer Lagerungen oder gleichmäßiger pneumatischer Spannvorrichtungen die Belastung der Kugelkante durch die Spannkraft erheblich. Die umfassende Anwendung dieser fortschrittlichen Technologien und Anlagen löst nicht nur spezifische Probleme wie Kantenausbrüche und -brüche, sondern fördert auch die allgemeine Verbesserung der Bearbeitungstechnologie.

#### **Aufbau eines umfassenden Qualitätsüberwachungs- und Fehlervermeidungssystems**

Die Einrichtung eines umfassenden Qualitätsüberwachungs- und -präventionssystems ist grundlegend für die Sicherstellung der gleichbleibenden Qualität beim Schleifen und Polieren von Wolframlegierungskugeln. Dieses System sollte alle Produktionsstufen vom Rohmaterial bis zum Fertigprodukt abdecken und ein geschlossenes Managementsystem bilden. Bei der Wareneingangsprüfung ist besonderes Augenmerk auf den Qualitätszustand der aus dem vorherigen Prozess übernommenen Kugeln zu legen, einschließlich Oberflächenintegrität, Kantenbeschaffenheit und Verteilung innerer Defekte. Alle Kugeln sind mit automatisierten optischen Prüfgeräten zu prüfen, und es sind individuelle Qualitätsdateien anzulegen, die als Datengrundlage für die weitere Bearbeitung dienen. Kugeln mit potenziellen Risiken, wie z. B. Mikrorissen oder unebenen Kanten, sind einer Isolationsbehandlung oder speziellen Prozessparametern zuzuführen.

Die Echtzeitüberwachung während des Bearbeitungsprozesses ist entscheidend für die Vermeidung von Fehlern. Mithilfe von Multiparameter-Sensorik können mechanische, thermische und akustische Signale während des Schleif- und Polierprozesses gleichzeitig erfasst werden. Kraftsensoren überwachen die Wechselwirkungskräfte zwischen Schleifscheibe und Werkstück, Temperatursensoren erfassen thermische Veränderungen im Bearbeitungsbereich und Schallemissionssensoren detektieren mikroskopische Schädigungssignale im Material. Diese Daten werden in Echtzeit mithilfe von Edge-Computing-Geräten analysiert und mit vordefinierten Prozessspezifikationen verglichen. Abweichungen werden sofort ausgelöst, um Anpassungsmechanismen zu aktivieren. Wird beispielsweise ein bestimmtes Muster von Schwankungen der Schnittkraft erkannt, kann das System automatisch den Vorschub reduzieren oder die Kühlmittelzufuhr erhöhen, um die Entstehung von Fehlern zu verhindern.

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

Die Einrichtung eines vorbeugenden Instandhaltungssystems ist entscheidend für die Stabilität der Anlagen. Basierend auf Betriebsdaten und historischen Wartungsaufzeichnungen werden Modelle für die vorausschauende Instandhaltung entwickelt, um die Restlebensdauer kritischer Komponenten und den optimalen Wartungszeitpunkt präzise zu bestimmen. Die Rundheit und Planheit von Schleifscheiben müssen regelmäßig kalibriert werden, um die Einhaltung der zulässigen Toleranzen sicherzustellen. Der Verschleißzustand von Schleifwerkzeugen wird durch eine Kombination aus Online-Überwachung und Offline-Analyse bewertet, um einen wissenschaftlich fundierten Austauschzyklus zu etablieren. Gleichzeitig ist die Überwachung von Umgebungsparametern unerlässlich, darunter die Partikelkonzentration in Reinräumen, die Temperatur- und Feuchtigkeitsstabilität usw. Obwohl diese Faktoren indirekt wirken, haben sie einen signifikanten Einfluss auf die Prozessqualität.

Systematische Analyse und Wissensmanagement von Qualitätsdaten bilden die Grundlage für kontinuierliche Verbesserung. Durch den Aufbau einer einheitlichen Qualitätsdatenplattform, die Inspektionsergebnisse und Prozessparameter aus verschiedenen Phasen integriert und Big-Data-Technologien zur Erkennung potenzieller Muster nutzt, entsteht eine Fehlermusterbibliothek. Verschiedene Arten von Kantenabsplittungen und -abplatzungen werden mit möglichen Ursachen korreliert und dienen als Referenz für die Problemdiagnose. Regelmäßige Qualitätsbesprechungen mit Experten aus den Bereichen Prozess, Anlagen und Qualität ermöglichen die gemeinsame Analyse und Optimierung der Prozessabläufe aus systemischer Sicht. Darüber hinaus werden bewährte Erfahrungen in Standardarbeitsanweisungen (SOPs) festgehalten und durch Schulungen sichergestellt, dass alle Bediener diese beherrschen. So wird eine Qualitätskultur der aktiven Beteiligung aller Mitarbeiter gefördert.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungskugeln

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

Terminologie für Wolframlegierungskugeln

Kategorie	Begriff	Begriffserklärung
Materialwissenschaft	Korngrenze	Die strukturellen Eigenschaften der Grenzflächenbereiche zwischen Körnern mit unterschiedlicher Orientierung in polykristallinen Werkstoffen haben einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und das Korrosionsverhalten des Materials.
	Phasenverteilung	Die räumliche Anordnung der verschiedenen Phasen im Mikrogefüge einer Legierung beeinflusst direkt die Härte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit des Materials.
	Restspannung	Innere Spannungen, die aufgrund ungleichmäßiger plastischer Verformung oder thermischer Zyklen während der Materialverarbeitung verbleiben, können zu Produktverformungen oder Leistungsänderungen führen.
	Bruchzähigkeit	Ein Parameter, der den Widerstand eines Materials gegen die Rissausbreitung misst und die Fähigkeit des Materials widerspiegelt, die instabile Ausbreitung makroskopischer Risse unter Belastung zu verhindern.
Herstellungprozess	isostatisches Pressen	Ein Umformverfahren, bei dem ein Werkstück mithilfe eines flüssigen oder gasförmigen Mediums in alle Richtungen gleichmäßig unter Druck gesetzt wird, trägt zur Herstellung eines hochdichten Vorformlings bei.
	Sintern	Der Prozess, bei dem Pulver oder gepresste Kompakte durch Massenmigration unter hoher Temperatur eine interpartikuläre Bindung erreichen, ist ein entscheidender Schritt zur Erzielung der endgültigen Eigenschaften.
	Heißisostatisches Pressen	Verarbeitungsverfahren, die Werkstoffe unter hoher Temperatur und hohem Druck behandeln, können innere Defekte wirksam beseitigen und die Materialdichte verbessern.
	gestaffelte Druckstrategie	Während des Schleifprozesses wird eine phasenweise Druckregelungsmethode eingesetzt, um ein Gleichgewicht zwischen Bearbeitungseffizienz und Oberflächengüte zu erreichen.
Defektanalyse	Kantenbruch	Lokale Beschädigungen an den Kanten eines Werkstücks entstehen in der Regel durch mechanische Beanspruchung, die die lokale Festigkeitsgrenze des Materials überschreitet.
	Heruntergefallene Blöcke	Das Abblättern von Material an der Oberfläche oder an den Kanten eines Werkstücks steht oft in engem Zusammenhang mit inneren Defekten oder Spannungskonzentrationen während der Bearbeitung.
	Stresskonzentration	Das Phänomen einer signifikanten Erhöhung der lokalen Spannung aufgrund abrupter Geometrieänderungen oder des Vorhandenseins von Defekten ist ein wichtiger auslösender Faktor für die Rissbildung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Mikrorisse	Im mikroskopischen Bereich beobachtete Materialrisse können sich während des Gebrauchs zu makroskopischen Rissen ausbreiten.
Qualitätskontrolle	Oberflächenintegrität	Eine umfassende Charakterisierung der Oberflächenmorphologie, der Mikrostruktur sowie der physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Werkstücks spiegelt den Einfluss der Bearbeitungstechnologie auf die Oberflächenqualität wider.
	Geometrische Genauigkeit	Der Grad der Übereinstimmung zwischen den tatsächlichen geometrischen Parametern des Werkstücks und den idealen Konstruktionswerten, einschließlich Indikatoren wie Rundheit und Maßgenauigkeit.
	Zerstörungsfreie Prüfung	Prüfverfahren zur Untersuchung innerer und oberflächlicher Materialfehler, ohne deren Leistungsfähigkeit zu beeinträchtigen.
	Prozessfenster	Der Bereich der Prozessparameter, mit denen sich qualifizierte Produkte stabil herstellen lassen, spiegelt die Robustheit und Kontrollierbarkeit des Herstellungsprozesses wider.
Verarbeitungstechnologie	Magnetorheologisches Polieren	Ein fortschrittliches Bearbeitungsverfahren für Präzisionspolieren, das das Prinzip der rheologischen Eigenschaftsänderungen magnetorheologischer Flüssigkeiten in einem Magnetfeld nutzt.
	Chemisch-mechanisches Polieren	Durch die Planarisierungstechnologie, die die Synergieeffekte von chemischem Ätzen und mechanischem Schleifen kombiniert, lassen sich Oberflächen mit extrem geringer Beschädigung erzielen.
	Ultraschallunterstütztes Schleifen	Eine kombinierte Bearbeitungstechnologie, die hochfrequente mechanische Vibrationen in den traditionellen Schleifprozess integriert, kann die Schnittkräfte effektiv reduzieren und die Bearbeitungsqualität verbessern.
	Adaptive Verarbeitung	Intelligente Fertigungsmethoden, die Prozessparameter automatisch auf Basis einer Echtzeitüberwachung des Verarbeitungsstatus anpassen, können die Prozessstabilität deutlich verbessern.
Detektionsmethoden	akustische Emissionserkennung	Dynamische Detektionstechnologie zur Beurteilung des inneren Schadenszustands durch Erfassung von elastischen Wellensignalen, die bei Materialbeanspruchung entstehen.
	Online-Überwachung	Eine Methode zur kontinuierlichen Überwachung für die Echtzeit-Erfassung und -Analyse von Prozessparametern und Produktqualitätsdaten während des Produktionsprozesses.
	Vorausschauende Wartung	Fortschrittliche Instandhaltungsstrategien für Anlagen basierend auf der Analyse von Betriebszustandsdaten und der Vorhersage von Ausfallzeiten.
	Digitaler Zwilling	Durch die Verwendung digitaler Mittel zur Erstellung virtueller Abbildungen physischer Objekte können wir reale Produktionsprozesse simulieren, analysieren und optimieren.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Referenzen

### Chinesische Referenzen

- [1] Wang Yuhua, Fan Jinglian, Liu Tao, et al. Aktueller Forschungsstand und Entwicklungstrends von Hochleistungslegierungen auf Wolframbasis mit hoher Dichte[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(8): 2987-3002.
- [2] Qu Xuanhui, Qin Mingli, Wu Botao. Herstellungstechnologie und Anwendungen von Wolfram-Schwermetalllegierungen[M]. Peking: Metallurgical Industry Press, 2020.
- [3] Zhang Lide, Mu Qiming. Forschungsfortschritte zur Anwendung von Nanomaterialien und Nanostrukturen in Wolframlegierungen[J]. Powder Metallurgy Technology, 2023, 41(2): 97-108.
- [4] Liu Wensheng, Ma Yunzhu. Forschungsfortschritte zur Flüssigphasensintertheorie und zum Verdichtungsverhalten von Wolfram-Schwermetalllegierungen[J]. China Tungsten Industry, 2021, 36(5): 1-9.
- [5] Cheng Xingwang, Yi Danqing, Wu Botao. Aktueller Stand und Entwicklungstrends von medizinischen Wolframlegierungs-Abschirmmaterialien[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(3): 601-612.
- [6] Fan Jinglian, Liu Tao, Cheng Huichao. Forschungsfortschritte bei Verstärkungs- und Zähigkeitstechnologien für Hochleistungs-Wolframlegierungen[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(4): 1-12.
- [7] Yang Xiaohong, Xiao Zhiyu, Luo Laima. Anwendung und Leistungsanforderungen von Wolframlegierungskollimatoren in medizinischen Linearbeschleunigern[J]. China Medical Devices, 2023, 38(7): 145-150.
- [8] Staatliche Marktregulierungsbehörde. GB/T 34560.1-2017 Wolframbasierte hochdichte Legierungen – Teil 1: Allgemeine technische Bedingungen[S]. Peking: Normenverlag Chinas, 2017.
- [9] Nationale Arzneimittelbehörde. YY/T 1636-2019 Technische Anforderungen an medizinische Wolframlegierungs-Kollimatoren[S]. Peking: Normenverlag Chinas, 2019.
- [10] Wu Yiping, Yang Fan. Forschungsfortschritte bei der Oberflächenschutztechnologie von Wolfram-Schwermetalllegierungen[J]. Surface Technology, 2023, 52(10): 78-89.

### Englische Referenzen

- [1] German RM, Suri P, Park S J. Übersicht: Flüssigphasensintern[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(1): 1-35.
- [2] Bose A, Eisen W B. Hochdichte Wolframlegierungen: Entwicklung und Anwendungen[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021, 98: 105547.
- [3] Upadhyaya G S. Materialwissenschaft von Wolfram-Schwermetalllegierungen: Verarbeitung und Eigenschaften[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(12): 6789-6825.
- [4] Zhang ZH, Wang FC, Li S K. Aktuelle Fortschritte bei wolframbasierten hochdichten Legierungen[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 865: 144612.
- [5] Luo LM, Lin J, Luo GN, et al. Wolfram-Schwermetalllegierungen für medizinische Kollimatoranwendungen: Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften[J]. Journal of Nuclear Materials, 2024, 592: 154927.
- [6] Das J, Appa Rao G, Pabi S K. Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften von Wolfram-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Schwermetalllegierungen[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 787: 139482.
- [7] ASTM B777-20 Standard Specification for Tungsten-Base, High-Density Alloys[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
- [8] Senthilnathan N, Raja Annamalai A, Venkatraman B. Wolfram-Schwermetalllegierungen als Strahlungsschutzmaterial: ein Überblick[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2022, 198: 110245.
- [9] Chen WG, Liu Y, Li J. Oberflächenmodifizierung und Schutzbeschichtungen für Wolfram-Schwermetalllegierungen[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 457: 129289.
- [10] Kiran UR, Kumar J, Kumar V, et al. Aktueller Stand und Zukunftsperspektiven von Wolfram-basierten Hochdichtelegierungen[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 78: 123-135.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungskugeln