

Was sind Wolframlegierungsdüsen

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
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 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

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

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1: Wolframlegierungsdüsen verstehen

- 1.1 Was ist eine Wolframlegierungsdüse?
 - 1.1.1 Definition und grundlegende Komponenten von Wolframlegierungsdüsen
 - 1.1.2 Klassifizierung von Wolframlegierungsdüsen
- 1.2 Der Wert von Wolframlegierungsdüsen: Warum Wolframlegierung wählen?
 - 1.2.1 Leistungssprung von Wolframlegierungsdüsen im Vergleich zu herkömmlichen Düsen
 - 1.2.2 Wert von Wolframlegierungsdüsen in typischen Szenarien
- 1.3 Grundlegende Eigenschaften von Wolframlegierungsdüsen
- 1.4 Branchenpositionierung und Anwendungsszenarien von Wolframlegierungsdüsen
 - 1.4.1 Die Rolle von Wolframlegierungsdüsen in der High-End-Fertigungsindustrie
 - 1.4.2 Typische Anwendungsszenarien von Wolframlegierungsdüsen

Kapitel 2 Aufbau von Wolframlegierungsdüsen

- 2.1 Wichtigste Strukturelemente von Wolframlegierungsdüsen
 - 2.1.1 Grundstruktur einer Wolframlegierungsdüse: Einlass, Strömungskanal und Auslass
 - 2.1.2 Strukturparameter von Wolframlegierungsdüsen
 - 2.1.2.1 Düsenparameter von Wolframlegierungsdüsen
 - 2.1.2.2 Kegelwinkelparameter von Wolframlegierungsdüsen
 - 2.1.2.3 Längenparameter von Wolframlegierungsdüsen
 - 2.1.2.4 Kollaboratives Design von Wolframlegierungsdüsen unter Berücksichtigung mehrerer Parameter
 - 2.1.3 Strukturtypen von Wolframlegierungsdüsen
 - 2.1.3.1 Gerade Lochdüse aus Wolframlegierung
 - 2.1.3.2 Konische Wolframlegierungsdüse
 - 2.1.3.3 Fächerförmige Wolframlegierungsdüse
 - 2.1.3.4 Andere Wolframlegierungsdüsen mit spezieller Struktur
 - 2.1.4 Strukturelle Ableitungseigenschaften von Wolframlegierungsdüsen
 - 2.1.4.1 Strömungsstabilität aufgrund der Strömungskanalstruktur
 - 2.1.4.2 Einfluss der Strukturgenauigkeit auf den Zerstäubungseffekt
- 2.2 Werkstoffspezifikationen der Wolframlegierung für Düsen
 - 2.2.1 Gängige Zusammensetzungsverhältnisse und Anwendungen von Wolframlegierungen für Düsen
 - 2.2.1.1 Grundrezeptur mit hohem Wolframgehalt (Wolframgehalt $\geq 90\%$)
 - 2.2.1.2 Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungsanteile
 - 2.2.1.3 Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungsverhältnis
 - 2.2.1.4 Spezialformulierung: Speziell angepasst für extreme Arbeitsbedingungen wie hohe Temperaturen und hohen Druck
 - 2.2.2 Spezifikationen und Kontrollanforderungen für in Düsen verwendete Wolframlegierungen
 - 2.2.2.1 Spezifikationen der chemischen Zusammensetzung von Wolframlegierungsdüsen
 - 2.2.2.2 Spezifikationen der physikalischen Eigenschaften von Wolframlegierungsdüsen
 - 2.2.2.3 Spezifikationen der mechanischen Eigenschaften von Wolframlegierungsdüsen
 - 2.2.2.4 Spezifikationen für die Bearbeitungsgenauigkeit von Wolframlegierungsdüsen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 3 Eigenschaften von Wolframlegierungsdüsen

- 3.1 Schmelzpunktcharakteristika von Wolframlegierungsdüsen
 - 3.1.1 Numerischer Bereich und Bestimmungsstandards für hohe Schmelzpunkte
 - 3.1.2 Der Wert eines hohen Schmelzpunktes für die Anpassungsfähigkeit an Hochtemperatur-Betriebsbedingungen
- 3.2 Dichteigenschaften von Wolframlegierungsdüsen
 - 3.2.1 Typischer Dichtebereich und Einflussfaktoren
 - 3.2.2 Der Korrelationsmechanismus zwischen hoher Dichte und Verschleißfestigkeit sowie Stabilität
- 3.3 Härteeigenschaften von Wolframlegierungsdüsen
 - 3.3.1 Gängige Prüfverfahren zur Bestimmung des Härteindex
 - 3.3.2 Korrelationsanalyse zwischen Härte und Nutzungsdauer
- 3.4 Festigkeitseigenschaften von Wolframlegierungsdüsen
 - 3.4.1 Kernindikatoren für Zugfestigkeit und Druckfestigkeit
 - 3.4.2 Festigkeitseigenschaften unter Hochdruckbedingungen
- 3.5 Chemische Stabilität von Wolframlegierungsdüsen
 - 3.5.1 Verhalten bei der Beständigkeit gegen Säure- und Laugenkorrosion
 - 3.5.2 Antioxidative Kapazität unter Hochtemperaturbedingungen
- 3.6 Wärmeleitfähigkeit von Wolframlegierungsdüsen
 - 3.6.1 Wichtige Parameterbereiche der Wärmeleitfähigkeit
 - 3.6.2 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf die Temperaturverteilung und die thermische Verformung
- 3.7 Elektrische Leitfähigkeit von Wolframlegierungsdüsen
 - 3.7.1 Numerische Kenngrößen der elektrischen Leitfähigkeit
 - 3.7.2 Anpassungsfähigkeit der Leitfähigkeit an spezifische Anwendungsszenarien
- 3.8 Verschleißfestigkeit von Wolframlegierungsdüsen
 - 3.8.1 Verschleißmechanismus und Kriterien zur Bewertung der Verschleißfestigkeit
 - 3.8.2 Methoden zur Material- und Strukturoptimierung zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit
- 3.9 Schlagfestigkeit von Wolframlegierungsdüsen
 - 3.9.1 Prüfverfahren und Indikatoren für die Schlagfestigkeit
 - 3.9.2 Die Bedeutung der Stoßfestigkeit für die Anpassungsfähigkeit an komplexe Arbeitsbedingungen
- 3.10 Dimensionsstabilität von Wolframlegierungsdüsen
 - 3.10.1 Gesetze der Dimensionsverformung bei Temperaturänderungen
 - 3.10.2 Einfluss der Dimensionsstabilität auf die Einspritzgenauigkeit
- 3.11 Strahlungsbeständigkeit von Wolframlegierungsdüsen
 - 3.11.1 Kernindikatoren zur Bewertung der Strahlungsbeständigkeit
 - 3.11.2 Anwendungsanpassungsfähigkeit in strahlungsbelasteten Umgebungen wie der Nuklearindustrie
- 3.12 Oberflächeneigenschaften von Wolframlegierungsdüsen
 - 3.12.1 Eigenschaften der Oberflächenrauheit und des Reibungskoeffizienten
 - 3.12.2 Die Rolle der Oberflächenbehandlung bei der Verbesserung der Eigenschaften
- 3.13 Dauerfestigkeit von Wolframlegierungsdüsen
 - 3.13.1 Prüfmethode und Einflussfaktoren für die Dauerfestigkeit
 - 3.13.2 Ermüdungsbeständigkeit unter wechselnden Lastbedingungen
- 3.14 Sicherheitsdatenblatt für Wolframlegierungsdüsen der CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 4 Herstellung von Wolframlegierungsdüsen

- 4.1 Rohmaterialaufbereitungsprozess für Wolframlegierungsdüsen: Vom Wolframerz zum Legierungspulver
 - 4.1.1 Vorbehandlung von Wolframerz: Aufbereitungs- und Reinigungsprozesse
 - 4.1.2 Herstellung von Wolframpulver: Reduktionsprozess und Partikelgrößenkontrolle
 - 4.1.3 Legierungsbehandlung: Wichtige Punkte der Dotierungs- und Mischprozesse
 - 4.1.4 Pulverleistungskontrolle: Optimierung der Fließfähigkeit und Schüttdichte
- 4.2 Formgebungsprozess von Wolframlegierungsdüsen: Rohlingformtechnologie und Auswahl
 - 4.2.1 Traditionelles Formpressen: Formpressprozess und Parametersteuerung
 - 4.2.2 Präzisionsumformtechnik: Vorteile des isostatischen Pressverfahrens
 - 4.2.3 Additive Fertigungstechnologie: Erkundung von 3D-Druckanwendungen
 - 4.2.4 Auswahl des Formgebungsverfahrens: Basierend auf Düsenspezifikationen und Chargenanforderungen
- 4.3 Sinterprozess von Wolframlegierungsdüsen: Kerntechnologie zur Verdichtung
 - 4.3.1 Vorbehandlung vor dem Brennen: Entfettungs- und Spannungsabbauprozess
 - 4.3.2 Hochtemperaturesintern: Wichtige Parameter für die Temperatur- und Atmosphärensteuerung
 - 4.3.3 Sinterverdichtungsmechanismus: Porositätskontrolle und Leistungskorrelation
 - 4.3.4 Vermeidung von Sinterfehlern: Maßnahmen zur Kontrolle von Rissbildung und Verformung
- 4.4 Nachbearbeitungstechnologie für Wolframlegierungsdüsen: Verbesserung von Präzision und Leistung
 - 4.4.1 Präzisionsbearbeitung: Bearbeitungstechnologie für Strömungskanäle und Stirnflächen
 - 4.4.2 Oberflächenbehandlungsverfahren: Polier- und Beschichtungsverbesserungstechnologien
 - 4.4.3 Dimensionskalibrierung: Präzisionsmess- und Korrekturverfahren
 - 4.4.4 Reinigung und Trocknung des Fertigprodukts: Spezifikationen des Verfahrens zur Entfernung von Verunreinigungen
- 4.5 Qualitätskontrolle der Rohmaterialphase für Wolframlegierungsdüsen
 - 4.5.1 Reinheitsprüfung von Wolframpulver
 - 4.5.2 Prüfverfahren zur Bestimmung der Gleichmäßigkeit der Legierungspulverzusammensetzung
 - 4.5.3 Prüfung der physikalischen Eigenschaften von Pulvern
- 4.6 Qualitätskontrolle von Wolframlegierungsdüsen während der Formgebungs- und Sinterphasen
 - 4.6.1 Verfahren zur Prüfung der Dichte und Kompaktheit des Rohlings
 - 4.6.2 Zusammensetzungs- und Mikrostrukturanalyse des Sinterkörpers
 - 4.6.3 Probenahme- und Prüfvorgaben für die mechanischen Eigenschaften von Sinterkörpern
- 4.7 Qualitätskontrolle von Wolframlegierungsdüsen im Fertigproduktstadium
 - 4.7.1 Prüfung der Maßgenauigkeit
 - 4.7.2 Oberflächenqualitätskontrolle
 - 4.7.3 Leistungsprüfung unter Betriebsbedingungen
- 4.8 Qualitätskontrollsystem und Normen für Wolframlegierungsdüsen
 - 4.8.1 Einrichtung eines umfassenden Rückverfolgbarkeitssystems für die Qualitätssicherung von Wolframlegierungsdüsen
 - 4.8.2 Festlegung wichtiger Qualitätskontrollpunkte
 - 4.8.3 Branchenübliche Qualitätsstandards und Konformitätsanforderungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 5 Vergleich von Wolframlegierungsdüsen mit Düsen aus anderen Materialien

5.1 Vergleich von Düsen aus Wolframlegierung und Düsen aus Edelstahl

5.1.1 Vergleich der Hochtemperaturbeständigkeit: Temperaturtoleranzbereich und Stabilität

5.1.2 Vergleich der Verschleißfestigkeit: Unterschiede in Verschleißrate und Lebensdauer

5.1.3 Vergleich der mechanischen Eigenschaften: Analyse der Kompatibilität zwischen Festigkeit und Zähigkeit

5.1.4 Wirtschaftlicher Vergleich: Umfassende Bewertung der Kosten und Wartungskosten

5.2 Vergleich von Wolframlegierungsdüsen und Keramikdüsen

5.2.1 Vergleich der mechanischen Eigenschaften: Unterschiede in der Schlagfestigkeit und Sprödigkeit

5.2.2 Vergleich der Verschleißfestigkeit: Verschleißverhalten gegenüber harten Partikeln und abrasivem Verschleiß

5.2.3 Vergleich der Verarbeitungsleistung: Formgenauigkeit und Anpassungsfähigkeit an komplexe Strukturen

5.2.4 Zuverlässigkeitsvergleich: Analyse der Temperaturwechselbeständigkeit und der Betriebsstabilität

5.3 Vergleich von Wolframlegierungsdüsen und Kupferlegierungsdüsen

5.3.1 Vergleich der Festigkeit bei hohen Temperaturen: Erhaltungsrate der mechanischen Eigenschaften unter Hochtemperaturbedingungen

5.3.2 Vergleich der Nutzungsdauer: Unterschiede im Dämpfungsverhalten unter verschiedenen Betriebsbedingungen

5.3.3 Vergleich der Wärmeleitfähigkeit: Eigenschaften der Wärmeleitung und Temperaturverteilung

5.3.4 Vergleich der Korrosionsbeständigkeit: Korrosionsbeständigkeit in sauren und alkalischen Medien

Kapitel 6 Anwendungsgebiete von Wolframlegierungsdüsen

6.1 Anwendung von Wolframlegierungsdüsen in der industriellen Fertigung

6.1.1 Schweißen und Schneiden: Wolframlegierungsdüse für Hochtemperaturspritzen

6.1.2 Oberflächenbeschichtung: Wolframlegierungsdüse für die Zerstäubungsformung

6.1.3 Metallurgisches Gießen: Wolframlegierungsdüsen für Hochtemperaturschmelzen

6.1.4 Präzisionsreinigung: Wolframlegierungsdüse für Hochdruckreinigung

6.2 Anwendung von Wolframlegierungsdüsen im Energie- und Bergbaubereich

6.2.1 Ölbohrung: Wolframlegierungsdüsen für die Hochdruck-Gesteinszerkleinerung

6.2.2 Kohlevergasung: Wolframlegierungsdüsen für Hochtemperaturreaktionen

6.2.3 Thermische Stromerzeugung: Wolframlegierungsdüsen zur Entschwefelung und Denitrifikation

6.2.4 Nutzung von Kernenergie: Wolframlegierungsdüsen für strahlungsresistente Umgebungen

6.3 Anwendung von Wolframlegierungsdüsen in High-End-Anlagen

6.3.1 Luft- und Raumfahrt: Wolframlegierungsdüsen für die Triebwerksgaseinspritzung

6.3.2 Schienenverkehr: Wolframlegierungsdüsen zur Kühlung von Bremssystemen

6.3.3 Medizinprodukte: Wolframlegierungsdüsen für Präzisionssprühen

6.3.4 Elektronikfertigung: Wolframlegierungsdüsen für die Chipverpackung

6.4 Anwendungen von Wolframlegierungsdüsen im militärischen und speziellen Bereich

6.4.1 Militärische Ausrüstung: Wolframlegierungsdüsen für spezielle Sprühsysteme

6.4.2 Weltraumstart: Wolframlegierungsdüsen für Antriebssysteme

6.4.3 Chemische Notfallmaßnahmen: Wolframlegierungsdüsen für den Umgang mit korrosiven Medien

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.4.4 Tiefseeerkundung: Wolframlegierungsdüsen für Hochdruckumgebungen
- 6.5 Anwendungen von Wolframlegierungsdüsen in Zukunftsfeldern
 - 6.5.1 3D-Druck: Wolframlegierungsdüse für Metallpulver-Jetting
 - 6.5.2 Wasserstoffenergieindustrie: Wolframlegierungsdüsen für Brennstoffzellen
 - 6.5.3 Kohlenstoffabscheidung: Düse aus Wolframlegierung für die Absorptionsmittelinjektion
 - 6.5.4 Lasertechnologie: Wolframlegierungsdüsen für die Zusatzkühlung

Kapitel 7 Auswahl, Installation und Wartung von Wolframlegierungsdüsen

- 7.1 Wissenschaftliche Auswahl von Wolframlegierungsdüsen
 - 7.1.1 Anpassung der Betriebsparameter: Anpassung der Wolframlegierungsdüse an Temperatur und Druck
 - 7.1.2 Medieneigenschaften und Kompatibilität: Düsen aus Wolframlegierung sind mit korrosiven Medien kompatibel.
 - 7.1.3 Anpassung der Leistungsanforderungen: Wolframlegierungsdüse und Strömungserstäubung
 - 7.1.4 Auswahl des Strukturtyps: Wolframlegierungsdüsenstruktur und Szenenanpassung
 - 7.1.5 Vermeidung häufiger Auswahlfehler: Analyse häufiger Probleme bei der Auswahl von Wolframlegierungsdüsen
- 7.2 Installation und Justierung von Wolframlegierungsdüsen: Wichtige Punkte zur Sicherstellung der Präzision
 - 7.2.1 Vorbereitung vor der Installation: Inspektion der Wolframlegierungsdüse und Kompatibilität des Zubehörs
 - 7.2.2 Spezifikationen für die Kerninstallation: Positionierungs- und Dichtungstechnologie für Wolframlegierungsdüsen
 - 7.2.3 Kontrolle der Installationsgenauigkeit: Kalibrierung der Koaxialität und Rechtwinkligkeit von Wolframlegierungsdüsen
 - 7.2.4 Kern-Debugging-Prozess: Kalibrierung von Durchfluss und Druck der Wolframlegierungsdüse
 - 7.2.5 Installation, Inbetriebnahme und Abnahme: Leistungsprüfungsstandards für Wolframlegierungsdüsen
- 7.3 Tägliche Wartung von Wolframlegierungsdüsen
 - 7.3.1 Wichtige Punkte für die regelmäßige Inspektion: Verschleiß- und Korrosionserkennung an Wolframlegierungsdüsen
 - 7.3.2 Reinigungs- und Wartungsstandards: Reinigung von Wolframlegierungsdüsen bei Verstopfung und Oberflächenpflege
 - 7.3.3 Bestimmung des Wartungszyklus: Wartungsplan für Wolframlegierungsdüsen basierend auf den Betriebsbedingungen
 - 7.3.4 Verwaltung von Verbrauchsmaterialien: Ersatzteil- und Lagerhaltungsstrategie für Düsenbauteile aus Wolframlegierung
- 7.4 Fehlersuche bei Wolframlegierungsdüsen
 - 7.4.1 Häufige Fehlerdiagnose: Analyse der Ursachen für anormale Durchflussraten in Wolframlegierungsdüsen
 - 7.4.2 Fehlersuche: Reparaturlösung für Verschleiß und Leckagen an Wolframlegierungsdüsen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.4.3 Umgang mit extremen Fehlern: Maßnahmen zur Behandlung von Rissen und Verformungen an Wolframlegierungsdüsen

7.4.4 Fehlervermeidungssystem: Risikomanagement über den gesamten Lebenszyklus von Wolframlegierungsdüsen

Kapitel 8 Häufige Probleme mit Wolframlegierungsdüsen

8.1 Häufige Probleme bei der Herstellung von Wolframlegierungsdüsen

8.1.1 Probleme bei der Rohmaterialaufbereitung: Unzureichende Reinheit und übermäßige Verunreinigungen in Wolframpulver

8.1.2 Probleme beim Formgebungsprozess: Rissbildung und ungleichmäßige Dichte des Rohlings

8.1.3 Probleme beim Sinterprozess: Verformung und unzureichende Dichte des Sinterkörpers

8.1.4 Probleme bei der Nachbearbeitung: Unzureichende Präzision der Strömungskanäle und Oberflächenfehler

8.2 Häufige Probleme bei der Auswahl und Anpassung von Wolframlegierungsdüsen

8.2.1 Problem der Anpassung der Betriebsbedingungen: Temperatur- und Druckabweichungen zur Düsenleistung

8.2.2 Problem bei der Strukturauswahl: Der Strömungskanaltyp entspricht nicht den Zerstäubungsanforderungen

8.2.3 Materialverträglichkeitsprobleme: Inkompatibilität zwischen Legierungszusammensetzung und korrosiven Medien

8.2.4 Probleme bei der Spezifikationsauswahl: Diskrepanz zwischen Düsendurchmesserparametern und Durchflussanforderungen

8.3 Häufige Probleme bei der Installation und Verwendung von Wolframlegierungsdüsen

8.3.1 Probleme bei Installation und Betrieb: Positionierungsabweichung und unzureichende Abdichtung

8.3.2 Probleme aufgrund unsachgemäßer Fehlersuche: Ungenaue Durchfluss- und Druckkalibrierung

8.3.3 Problem der Anpassung an die Betriebsbedingungen: Die Leistung verschlechtert sich unter extremen Umgebungsbedingungen zu schnell

8.3.4 Probleme beim kollaborativen Betrieb: Unzureichende Kompatibilität mit unterstützender Ausrüstung

8.4 Häufige Probleme bei der Wartung und Fehlersuche an Wolframlegierungsdüsen

8.4.1 Probleme aufgrund mangelhafter Wartung: Unvollständige Reinigung und Versäumnisse bei der Inspektion

8.4.2 Verschleiß- und Korrosionsprobleme: Ungewöhnlicher Verschleiß und starke lokale Korrosion

8.4.3 Probleme bei der Fehlerdiagnose: Fehlinterpretation von Ursachen für anormale Durchflussmengen und Leckagen

8.4.4 Probleme bei Austausch und Aufrüstung: Vorzeitiger Austausch anfälliger Teile und nicht zusammenpassende Modelle

Anhang

Anhang A: Chinesischer Standard für Wolframlegierungsdüsen

Anhang B: Internationale Normen für Wolframlegierungsdüsen

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

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

Anhang C: Wolframlegierungs-Düsennormen Europas, Amerikas, Japans, Südkoreas und anderer Länder

Anhang D: Terminologietabelle für Wolframlegierungsdüsen

Referenzen



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsdüsen

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
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/cm³), 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

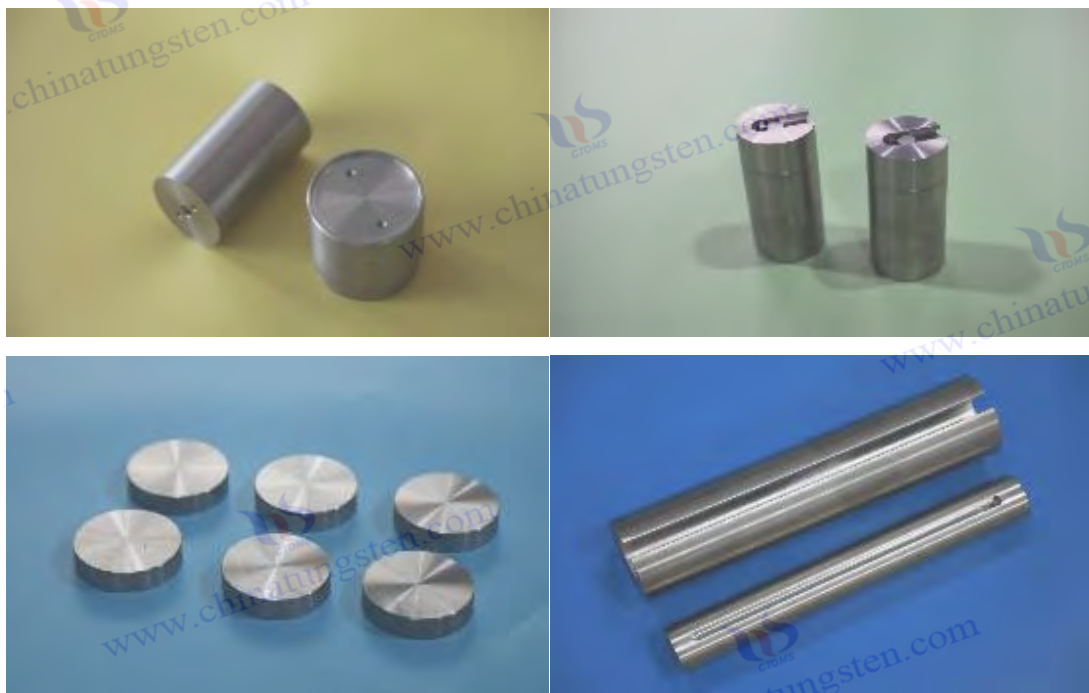
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



Kapitel 1: Wolframlegierungsdüsen verstehen

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

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

1.1 Was ist eine Wolframlegierungsdüse?

Wolframlegierungsdüsen sind hochdichte, hochfeste und verschleißfeste Funktionsbauteile mit einer speziellen Strömungskanalstruktur. Sie bestehen hauptsächlich aus Wolfram (typischerweise mit einem Massenanteil von über 85 %) und enthalten Bindemittel wie Nickel, Eisen, Kupfer, Kobalt oder Molybdän. Die Herstellung erfolgt mittels pulvermetallurgischer Flüssigphasenintervallverfahren. Unter extremen Betriebsbedingungen sind sie unerlässlich für das gerichtete Ausstoßen von Hochdruckgasen, Flüssigkeiten, geschmolzenen Partikeln oder Plasma mit extrem hohen Geschwindigkeiten, höchster Präzision und extrem niedrigen Divergenzwinkeln. Gleichzeitig müssen sie langfristigen Belastungen durch Hochtemperaturoxidation, abrasive Erosion, Kavitationsermüdung, Thermoschockrisse und die kombinierte Einwirkung hochkorrosiver Medien standhalten. Im Vergleich zu herkömmlichen Düsen aus Hartmetall, Zirkonoxidkeramik, Edelstahl, Titanlegierungen und sogar reinem Wolfram stellen Düsen aus Wolframlegierungen einen qualitativen Sprung hinsichtlich Härte, Zähigkeit, Dichte, Temperaturbeständigkeit, Erosionsbeständigkeit und Wirtschaftlichkeit dar. Sie haben sich zu den wichtigsten und anspruchsvollsten Düsenantrieben in Spitzentechnologien wie dem thermischen Spritzen, dem HVOF-Spritzen (Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen), dem Plasmaspritzen, dem Kaltspritzen, dem Hochdruckwasserstrahlschneiden, der Pulverzuführung beim Laserauftragschweißen, der Common-Rail-Einspritzung von Dieselmotoren, Gasturbinenbrennkammern, dem industriellen Sandstrahlen und Entrosten, der Präzisionszerstäubung und Plasmaerzeugung entwickelt.

Die Entwicklung von Düsen aus Wolframlegierungen ist im Wesentlichen das Ergebnis der engen Verknüpfung von Materialwissenschaften mit Disziplinen wie Strömungsmechanik, Thermodynamik und Oberflächentechnik. Sie vereinen nicht nur den extrem hohen Schmelzpunkt, die Härte und die Beständigkeit gegen Erweichung von Wolfram, sondern überwinden durch die Einbringung einer duktilen Bindemittelphase auch die inhärente Sprödigkeit von reinem Wolfram und Keramik. So wird eine ideale Kombination aus Härte und Zähigkeit erreicht. Gleichzeitig führt die hohe Dichte zu enormer Massenträgheit und Wärmekapazität, wodurch die geometrische Stabilität im Millisekundenbereich selbst unter dem Rückstoß von Hochgeschwindigkeitsstrahlen und hohen Temperaturschocks erhalten bleibt. Kontrollierbarer Magnetismus und exzellente Wärmeleitfähigkeit ermöglichen einen sicheren Betrieb in starken elektromagnetischen Feldern oder Umgebungen mit hoher thermischer Belastung. Diese optimale Balance multidimensionaler Eigenschaften hebt Düsen aus Wolframlegierungen von zahlreichen anderen Werkstoffen ab und macht sie zum entscheidenden Faktor für moderne Industrieprozesse mit höchsten Anforderungen an Sprühpräzision, Lebensdauer und Betriebssicherheit.

Aus einer umfassenderen Perspektive stellen Düsen aus Wolframlegierungen eine typische Weiterentwicklung von hochdichten Legierungen hinsichtlich Funktionalität, Präzision und extremen Anwendungsbereichen dar. Sie sind nicht mehr nur verschleißfeste Bauteile, sondern vielmehr systemrelevante Schlüsselkomponenten, die Energieumwandlung, Stofftransport, Oberflächenmodifizierung und Umweltschutz integrieren. Eine scheinbar unbedeutende Düse entscheidet oft darüber, ob Anlagen im Wert von Hunderten Millionen Yuan in einer gesamten Produktionslinie stabil funktionieren, ob die Beschichtungsqualität den Standards der Luft- und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Raumfahrt entspricht, ob die Präzision beim Wasserstrahlschneiden im Mikrometerbereich liegt und ob die Kraftstoffzerstäubung extrem niedrige Emissionen erzielt. Daher sollte das Verständnis von Düsen aus Wolframlegierungen nicht auf „eine Düse aus verschleißfestem Material“ beschränkt sein, sondern auf die strategische Ebene des „kritischsten und gleichzeitig wichtigsten Glieds in der modernen High-End-Fertigungsprozesskette“ gehoben werden. Nur durch ein tiefes Verständnis des Zusammenspiels von Material, Struktur, Prozess und Umgebung können wir die Initiative in Design, Fertigung und Anwendung dieser Düsen wirklich ergreifen.

1.1.1 Definition und grundlegende Komponenten von Wolframlegierungsdüsen

Eine Wolframlegierungsdüse lässt sich präzise wie folgt definieren: ein Funktionsbauteil mit definierter Strömungskanalgeometrie, hergestellt aus einer hochdichten Wolframlegierung (Wolframgehalt mindestens 85 %) durch Kaltisostatisches Pressen, Vakuum- oder Wasserstoff-Flüssigphasensintern, Präzisionsbearbeitung und optionale Oberflächenhärtung. Sie dient der Erzeugung von Überschall-/Hochgeschwindigkeits-Richtstrahlförderung von Hochdruckfluiden oder Partikelstrahlen. Ihre grundlegenden Komponenten umfassen drei Kernelemente: das Strömungskanalsystem, das externe Schnittstellensystem und die Oberflächenfunktionsschicht.

Das Strömungskanalsystem ist entscheidend für die Düsenleistung und besteht typischerweise aus Einlass, Konvergenz, engstem Querschnitt (minimaler Querschnitt) und Expansionsabschnitt. Die gängigste Konfiguration ist eine Laval-Düse, sie kann aber je nach Bedarf auch als gerades Rohr, Venturi-Rohr oder mehrstufige Konvergenz-/Expansionsstruktur ausgeführt sein. Der Durchmesser des engsten Querschnitts und die Oberflächenrauheit bestimmen direkt die Strahlgeschwindigkeit, die Strömungsstabilität und die Energieausnutzung. Das externe Schnittstellensystem wird entsprechend der Installationsmethode ausgelegt und verwendet Gewindeverbindungen, Flansche, Schnellspannklemmen, eingelötete Bauteile oder integrierte Konstruktionen, um eine hochpräzise Passform und Luftdichtheit mit der Spritzpistole, dem Boosterzylinder oder der Brennkammer zu gewährleisten. Die Oberflächenfunktionsschicht ist ein wesentlicher Vorteil, der moderne Wolframlegierungsdüsen von herkömmlichen Düsen unterscheidet. Dies umfasst Borierungshärtungsschichten, PVD TiAlN / CrN / DLC-Beschichtungen, laserumgeschmolzene dichte Schichten oder Verbund-Mehrschichtsysteme, die zur weiteren Verbesserung der Beständigkeit gegen Erosion, Oxidation, Adhäsion und Thermoschock eingesetzt werden.

Auf mikroskopischer Ebene weisen Düsen aus Wolframlegierungen eine zweiphasige Struktur auf: Harte Wolframpartikel bilden ein durchgehendes oder nahezu durchgehendes Gerüst, während eine Bindemittelphase die Zwischenräume gleichmäßig ausfüllt und eine netzartige Beschichtung bildet. Die Wolframpartikel sorgen für Härte und Verschleißfestigkeit, die Bindemittelphase hingegen für Zähigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit. Zusammen gewährleisten sie, dass die Düse selbst bei zehntausenden Stößen durch abrasive Partikel oder kurzzeitigen Temperaturwechseln von Tausenden von Grad keine plastische Verformung oder sprödes Absplittern erleidet. Diese Struktur ermöglicht zudem eine hervorragende Bearbeitbarkeit und Reparierbarkeit der Düse. Durch präzise CNC-Bearbeitung lassen sich komplexe interne Strömungskanäle und Toleranzen im Mikrometerbereich

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hinsichtlich Abmessungen und Position realisieren. Nach lokalem Verschleiß kann die Lebensdauer durch Neubeschichtung oder Umschmelzen mehrfach verlängert werden.

1.1.2 Klassifizierung von Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen bilden ein mehrdimensionales Klassifizierungssystem, das Zusammensetzung, Strömungskanalgeometrie, Anwendungsgebiet, Arbeitsmedium, Oberflächenverstärkung und Druckfestigkeit umfasst. Jede Dimension entspricht einem klaren Leistungsfokus und einem spezifischen Prozessablauf.

Düsen werden nach ihrer Materialzusammensetzung in Wolfram-Nickel-Eisen-Düsen (hohe Festigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit), Wolfram-Nickel-Kupfer-Düsen (nicht magnetisch, korrosionsbeständig), Wolfram-Kupfer-Düsen (hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit), Wolfram-Nickel-Molybdän/Rhenium-Düsen (extrem hohe Kriechfestigkeit bei hohen Temperaturen) und mit Seltenerdmetallen oder Karbiden verstärkte Düsen eingeteilt. Nach ihrer Strömungskanalgeometrie werden sie in Laval-Überschalldüsen, Venturi-Düsen, gerade Rohrdüsen, Mehrloch-Split-Düsen und koaxiale Pulverzuführungsdüsen unterteilt. Nach ihren Anwendungsgebieten werden sie in thermische Spritzdüsen (HVOF, APS, Kaltspritzen), Hochdruckwasserstrahldüsen, Düsen zum Sandstrahlen und Entrosten, Brennstoff-/Gaszerstäubungsdüsen, Pulverzuführungsdüsen für das Laserauftragschweißen, Elektroendüsen für Plasmageneratoren und industrielle Reinigungsdüsen klassifiziert. Je nach Arbeitsmedium und Druckniveau werden sie in folgende Kategorien eingeteilt: Hochdruck-Wassermedium-Verfahren, Hochgeschwindigkeits-Pulvergas-Verfahren, Hochtemperatur-Plasma-Verfahren und Niederdruck-Zerstäubungsverfahren. Hinsichtlich des Oberflächenhärtungsverfahrens werden sie in folgende Kategorien unterteilt: Borierungsverfahren, PVD-Hartbeschichtungsverfahren, DLC-Gleitbeschichtungsverfahren, Laserumschmelzverfahren und mehrschichtige Verbundwerkstoffverfahren.

Die oben genannten Klassifizierungskriterien lassen sich frei kombinieren, um ein hochgradig individualisiertes Produktportfolio zu erstellen. Beispielsweise kann eine Laval-Düse aus Wolfram-Nickel-Kupfer zur Entrostung von Offshore-Windkraftanlagenflügeln gleichzeitig vier Haupteigenschaften aufweisen: Nichtmagnetismus, Beständigkeit gegen Salzsprühnebelkorrosion, DLC-Beschichtung und Kompatibilität mit Hochdruckwasser. Eine Düse aus Wolfram-Nickel-Eisen für die HVOF-Beschichtung von Triebwerken hingegen zeichnet sich durch hohe Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen, Borhärtung und Stabilität im Überschallbereich aus. Diese systematische und kombinierbare Klassifizierungsmethode erfüllt nicht nur die vielfältigen Anforderungen der Industrie, sondern bietet Werkstoffingenieuren auch einen klaren Weg zur Konstruktion und Auswahl.

1.2 Der Wert von Wolframlegierungsdüsen: Warum Wolframlegierung wählen?

Wolframlegierungsdüsen haben in den letzten zwei Jahrzehnten Hartmetall-, Keramik-, Edelstahl-, Titanlegierungs- und sogar reine Wolframdüsen rasant verdrängt und sind zum absoluten Standard in High-End-Strahlverfahren geworden. Dies liegt daran, dass sie ein multidimensionales

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistungsgleichgewicht erreicht haben, das traditionelle Werkstoffe unter anspruchsvollsten Betriebsbedingungen nicht erzielen können: Sie sind hart genug, um abrasiver Erosion zu widerstehen, und zäh genug, um Sprödbrüche zu vermeiden; sie behalten ihre Form bei kurzzeitigen Temperaturen von Tausenden von Grad und funktionieren über lange Zeiträume zuverlässig unter den kombinierten Einflüssen von Hochdruckwasserschlag und Kavitation; sie besitzen eine hohe Dichte, die für ausreichende Massenträgheit zur Vibrationsdämpfung sorgt, und eine gute Wärmeleitfähigkeit zur schnellen Ableitung lokaler Temperaturschocks; sie sind chemisch inert, um starker Oxidation und Korrosion zu widerstehen, und können präzisionsbearbeitet und oberflächenfunktionalisiert werden, um die Anforderungen von Strömungskanälen im Mikrometerbereich und komplexen Grenzflächen zu erfüllen.

1.2.1 Leistungssprung von Wolframlegierungsdüsen im Vergleich zu herkömmlichen Düsen

Im Vergleich zu herkömmlichen Düsenmaterialien stellen Düsen aus Wolframlegierungen einen qualitativen Sprung in nahezu allen Kernindikatoren dar, die Lebensdauer und Prozessqualität bestimmen. Hartmetalldüsen weisen zwar eine hohe Härte auf, ihre unzureichende Zähigkeit macht sie jedoch anfällig für Mikrorissbildung und Abplatzungen unter dem Einfluss von Hochgeschwindigkeitsluftströmen oder Ultrahochdruckwasserstrahlen mit harten Partikeln. Wolframlegierungsdüsen hingegen verbessern durch die Einbringung einer duktilen Bindemittelphase die Schlagzähigkeit signifikant und behalten gleichzeitig eine Härte nahe der von Hartmetall bei. Dadurch verlängert sich ihre Lebensdauer unter gleichen Betriebsbedingungen um ein Vielfaches. Zirkonoxidkeramikdüsen sind zwar hitzebeständig und chemisch inert, aber von Natur aus spröde und zerbrechen bei Temperaturschocks oder mechanischen Vibrationen. Im Gegensatz dazu ermöglicht die Temperaturwechselbeständigkeit von Wolframlegierungsdüsen einen langen Einsatz ohne Rissbildung in den anspruchsvollen Umgebungen des Plasmaspritzens und Laserauftragschweißens, wo starke Temperaturschwankungen auftreten.

Düsen aus Edelstahl und Titanlegierungen eignen sich für die routinemäßige Reinigung und das Sprühen mit niedrigem Druck, neigen jedoch bei Einwirkung von oxidierenden Hochtemperaturatmosphären oder stark korrosiven Medien schnell zu Lochfraß, Oxidation oder Erweichung. Wolframlegierungsdüsen, insbesondere solche aus Wolfram-Nickel-Kupfer, bleiben in Säuren, Laugen, Salznebel und oxidierenden Hochtemperaturumgebungen nahezu inert, und ihre Oberflächen zeigen nach geeigneter Passivierung oder Beschichtung kaum Massenverlust oder Dimensionsänderungen. Obwohl Düsen aus reinem Wolfram und Molybdän extrem hohe Schmelzpunkte aufweisen, neigen sie bei hohen Temperaturen zu Rekristallisationsversprödung und Oxidationsabtrag. Wolframlegierungsdüsen erreichen durch den Einsatz einer Bindemittelphase zur Hemmung der Rekristallisation und Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit deutlich höhere Temperaturbeständigkeitsgrenzen und Lebensdauern als reine Metalle.

Hinsichtlich Strahlqualität und Prozessstabilität führen die hohe Dichte und der extrem niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient von Wolframlegierungsdüsen zu minimalen geometrischen Verformungen unter Hochgeschwindigkeitsrückstoß und Temperaturschock. Der Düsenhalsdurchmesser

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und die Innenwandrauheit bleiben über lange Zeiträume konstant, wodurch eine hohe Konstanz von Strahlggeschwindigkeit, Divergenzwinkel und Durchflussrate gewährleistet wird. Im Gegensatz dazu verschlechtert sich die Strahlqualität bei Düsen aus herkömmlichen Materialien häufig rapide aufgrund von thermischer Verformung oder Verschleiß, was häufige Ausfallzeiten für den Austausch erforderlich macht. Insgesamt beheben Wolframlegierungsdüsen die Schwächen herkömmlicher Düsen und verstärken gleichzeitig deren Vorteile, wodurch ein Quantensprung von „kaum brauchbar“ zu „unersetzlich“ erreicht wird. Dies führt auch zu spürbaren Qualitätsverbesserungen in nachgelagerten Prozessen, wie z. B. höherer Haftung der Beschichtung, geringerer Schnittfugenbreite, feineren Zerstäubungspartikeln und höherer Reinigungseffizienz.

1.2.2 Wert von Wolframlegierungsdüsen in typischen Szenarien

Beim Überschall-Flammspritzen (HVOF) von Wärmedämmschichten für Triebwerke müssen die Düsen gleichzeitig der Belastung durch einen Hochgeschwindigkeits- und Hochtemperatur-Luftstrom mit Zirkonoxidpartikeln sowie starken Temperaturschocks standhalten. Hartmetalldüsen erreichen typischerweise nur eine Lebensdauer von wenigen hundert Stunden, bevor es zu starkem Aufweiten und einer Verschlechterung der Beschichtungsqualität kommt. Wolframlegierungsdüsen hingegen, die eine überlegene Beständigkeit gegen Partikelerosion und Hochtemperaturerweichung aufweisen, können problemlos eine Lebensdauer von mehreren tausend Stunden erreichen. Dies reduziert die Anzahl der Ausfallzeiten für Düsenwechsel und die Nachbearbeitungsrate der Beschichtung erheblich und senkt die Beschichtungskosten pro Triebwerk für Triebwerkswartungsunternehmen um mehrere zehn Prozentpunkte. Gleichzeitig wird sichergestellt, dass die Haftfestigkeit und die Wärmedämmleistung der Wärmedämmschicht stets auf höchstem Niveau sind.

Bei der Hochdruck-Wasserentrostung von Schiffen und Offshore-Windparks kommt es bei herkömmlichen Wolframkarbiddüsen häufig innerhalb weniger Wochen unter dem Einfluss von Salzsprühnebel und extrem hohem Druck zu Kavitationslöchern und einer Erweiterung des Düsenhalses. Dies führt zu einer geringeren Entrostungsleistung und einem erhöhten Wasserverbrauch. Düsen aus Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung mit DLC- oder CrN- Beschichtung verhindern Korrosion und Kavitation vollständig und verlängern die Lebensdauer einer einzelnen Düse auf Tausende von Stunden oder mehr. Dadurch wird der Betrieb von häufigem Düsenwechsel auf nahezu wartungsfrei umgestellt, was die Effizienz und Sicherheit von Offshore-Anlagen erheblich verbessert.

Bei anspruchsvollen Laserauftragschweißverfahren mit koaxialer Pulverzufuhr können Pulveranhaftungen, Verschleiß und Ausbeulungen an der Innenwand der Pulverzuführungsdüse zu Pulverstrahlstreuung, instabilem Schmelzbad und Präzisionsverlust führen. Die spiegelglatte Innenwand der Wolframlegierungsdüse und ihr extrem niedriger Reibungskoeffizient gewährleisten einen gleichmäßigen, haftungsfreien Pulverfluss. Der Düsenquerschnitt bleibt über Tausende von Stunden unverändert, wodurch die Breitenabweichung einer einzelnen Auftragsschicht im Mikrometerbereich gehalten wird. Dies bietet unersetzliche Präzisions- und Zuverlässigkeitsgarantien für hochwertige Reparaturprojekte wie die Instandsetzung von Hauptleitungen in Kernkraftwerken und die Überholung von hydraulischen Stützkonstruktionen im Bergbau.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

In der medizinischen Sprühtechnik und Präzisionszerstäubung eliminieren nichtmagnetische Wolfram-Nickel-Kupfer-Düsen vollständig den Einfluss von Magnetfeldern auf die Flugbahn der Wirkstoffpartikel und die Gleichmäßigkeit der Abscheidung. Dies ermöglicht eine beispiellose Konsistenz der Wirkstoffbeschichtung von Stents und verbessert direkt die klinische Erfolgsrate implantierbarer Medizinprodukte sowie die Patientensicherheit. Genau diese konkreten Vorteile – längere Lebensdauer, höhere Qualität, geringere Kosten und niedrigere Risiken in diesen typischen Anwendungsfällen – machen den überwältigenden Wert von Wolframlegierungsdüsen aus und verwandeln sie von einer „teuren High-End-Option“ zur „langfristig wirtschaftlichsten und wichtigsten Lösung“.

1.3 Grundlegende Eigenschaften von Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen behalten ihre geometrische Genauigkeit, Strahlqualität und Funktionssicherheit auch unter extremen Bedingungen über lange Zeiträume bei. Dies ist im Wesentlichen auf die vielfältigen Eigenschaften des Materials selbst auf physikalischer, mechanischer, thermischer, chemischer und technologischer Ebene zurückzuführen. Diese Eigenschaften existieren nicht isoliert, sondern bilden durch den Synergieeffekt der pulvermetallurgischen Zweiphasenstruktur, der Optimierung der Bindemittelphase und der Oberflächenbehandlung ein hochgradig gekoppeltes Leistungssystem mit nahezu keinen erkennbaren Schwächen. Dadurch übertrifft Wolframlegierung herkömmliche Düsenmaterialien in fast allen wichtigen Indikatoren deutlich und bildet die Grundlage für moderne High-End-Strahlverfahren.

Erstens zeichnet es sich durch extrem hohe Härte und ausgezeichnete Verschleißfestigkeit aus. Wolframpartikel selbst sind extrem hart, und bei der Bildung eines durchgehenden oder halbdurchgehenden Gerüsts übertrifft die Gesamthärte der Düse die von herkömmlichen Hartmetallen und Edelstahl bei Weitem. Selbst bei Hochgeschwindigkeitserosion durch Aluminiumoxid-, Siliciumcarbid-, Glasperlen-, Granat- oder sogar Diamantpartikel entstehen an der Oberfläche nur sehr flache plastische Rillen mit nahezu keinem Massenverlust. Dadurch bleiben Düsenhalsdurchmesser und Innenwandglätte über Tausende von Stunden weitgehend unverändert. Zweitens weist es eine hohe Zähigkeit und eine hohe Beständigkeit gegen thermische Schocks und Kavitation auf. Die duktile Bindemittelphase kompensiert die inhärente Sprödigkeit von reinem Wolfram und Keramik vollständig. Dadurch wird die Düse vor Spröbruch und Ermüdungsrissen bei kurzzeitigen Plasmastrahlen von Tausenden von Grad, Hochdruckwasserschlägen oder schnellen Temperaturänderungen geschützt, was ihre Lebensdauer unter komplexen Belastungsbedingungen deutlich verlängert.

Hochtemperaturstabilität ist ein weiteres Schlüsselmerkmal. Düsen aus Wolframlegierungen weisen hohe Rekristallisationstemperaturen, niedrige Wärmeausdehnungskoeffizienten und minimalen Festigkeitsverlust bei hohen Temperaturen auf. Selbst bei dauerhaften Temperaturen über 1000 °C oder kurzzeitigen Temperaturen über 2000 °C bleibt die Strömungskanalgeometrie im Mikrometerbereich stabil. Dadurch werden die bei herkömmlichen Werkstoffen üblichen Probleme der thermischen Erweichung, der thermischen Verformung und der Oxidationsabtragung vollständig vermieden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hervorragende chemische Inertheit und Korrosionsbeständigkeit sind ebenso bemerkenswert. Insbesondere das Wolfram-Nickel-Kupfer-System zeigt praktisch keine sichtbare Korrosion in Säuren, Laugen, Salznebel, feuchter Hitze und verschiedenen organischen Lösungsmitteln. Mit Oberflächenpassivierung oder Funktionsbeschichtungen kann es über lange Zeiträume in anspruchsvollsten chemischen und maritimen Umgebungen eingesetzt werden.

Die hohe Dichte bietet Vorteile hinsichtlich Massenträgheit und Wärmekapazität. Dies führt zu minimalen Düsenvibrationen und langsamer thermischer Reaktion bei hohem Strahlrückstoß und lokalem Temperaturschock, wodurch Strahlstabilität und Zielgenauigkeit gewährleistet werden. Die ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit leitet die im Düsenhals entstehende Wärme schnell an das externe Kühlsystem ab und verhindert so Materialschäden durch lokale Überhitzung. Kontrollierbare magnetische Eigenschaften (einstellbar von vollständig nichtmagnetisch bis schwachmagnetisch) ermöglichen den sicheren Einsatz in starken Magnetfeldern oder präzisen elektromagnetischen Umgebungen ohne Wirbelstromwärme oder Abweichungen von der Strahlrichtung. Der extrem niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient und die ausgezeichnete Dimensionsstabilität gewährleisten einen zuverlässigen Kontakt zwischen Düse und Substraten wie Stahl, Titan und Keramik über einen weiten Temperaturbereich und verhindern Lockerung oder Spannungskonzentrationen durch Wärmeausdehnung und -kontraktion.

Schließlich zeichnen sich Düsen aus Wolframlegierungen auch durch hervorragende Präzisionsbearbeitung und Oberflächenfunktionalisierungsmöglichkeiten aus. Durch Kaltisostatisches Pressen, Präzisionssintern und mehrachsige CNC-Bearbeitung lassen sich komplexe interne Strömungskanäle, Maß- und Positionstoleranzen im Mikrometerbereich sowie spiegelglatte Innenwände realisieren. Oberflächenhärtungsverfahren wie Borieren, PVD, CVD, DLC und Laserschmelzen können eingesetzt werden, um Verschleißfestigkeit, Antihafwirkung und Oxidationsbeständigkeit weiter zu verbessern. Diese grundlegenden Eigenschaften ergeben zusammen ein umfassendes Bild von „hart, aber nicht spröde, heiß, aber nicht weich, korrosiv, aber nicht korrosiv und präzise, aber reparierbar“. Genau diese Eigenschaften heben Düsen aus Wolframlegierungen von zahlreichen anderen Werkstoffen ab und machen sie zum wichtigsten, zuverlässigsten und unverzichtbaren Kernbestandteil moderner thermischer Spritz-, Wasserstrahl-, Laserauftragschweiß-, Präzisionszerstäubungs-, Plasmaerzeugungs- und Hochtemperaturverbrennungsprozesse. Jede ihrer Eigenschaften adressiert direkt die größten Herausforderungen in industriellen Anwendungen, und die Kombination all dieser Eigenschaften schafft einen unersetzlichen Gesamtwert.

1.4 Branchenpositionierung und Anwendungsszenarien von Wolframlegierungsdüsen

Düsen aus Wolframlegierungen haben sich von einer hochwertigen, verschleißfesten Komponente zu einem unverzichtbaren Prozessstreiber und Leistungsfaktor in der modernen High-End-Fertigungskette entwickelt. Sie sind keine entbehrlichen Verbrauchsmaterialien mehr, sondern Voraussetzung für die Etablierung, Stabilität und optimale Leistung vieler Spitzenprozesse. Unzureichende Düsenleistung kann eine Kettenreaktion negativer Folgen auslösen, darunter verminderte Haftung der Beschichtung, Verlust der Schnittpräzision, ungleichmäßige Zerstäubung der Partikelgröße, ein starker Abfall der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Reinigungseffizienz und sogar Anlagenstillstände. Daher gelten Düsen aus Wolframlegierungen in Branchen mit hoher Wertschöpfung wie Luft- und Raumfahrt, Energie und Strom, Medizintechnik, Elektronikfertigung, Schiffbau und Meerestechnik, Automobilindustrie und additiver Fertigung als kritische Kernverbrauchsmaterialien und strategische Funktionskomponenten. Ihre Auswahl, Versorgungssicherheit und die Geschwindigkeit der technologischen Weiterentwicklung sind direkt in die Kernsysteme des Lieferkettenmanagements von OEMs und Prozessdienstleistern integriert.

1.4.1 Die Rolle von Wolframlegierungsdüsen in der High-End-Fertigungsindustriekette

In der High-End-Fertigungskette stellen Düsen aus Wolframlegierung den anspruchsvollsten Engpass dar und spielen eine entscheidende Rolle bei der Energieumwandlung, dem präzisen Materialtransport und der Oberflächenfunktionalisierung. Sie dienen als Austrittsöffnung für Hochleistungsanlagen wie Hochdruckpumpen, Plasmaanlagen, Laser und Brennkammern und sind gleichzeitig die erste Kontaktfläche, an der Pulver, Tröpfchen, Strahlen, Plasmen und Werkstückoberflächen physikalisch-chemischen Reaktionen unterliegen. Selbst ein geringfügiger Defekt einer einzelnen Düse kann Anlagen im Wert von Hunderttausenden bis Hunderten Millionen Yuan außer Betrieb setzen und die Nachbearbeitung dutzender nachgelagerter Prozesse erforderlich machen.

In der thermischen Spritz- und Oberflächentechnik bestimmen Wolframlegierungsdüsen die Partikelfluggeschwindigkeit, den Temperaturverlauf und die Aufprallenergie und legen damit direkt die Beschichtungsdichte, die Haftfestigkeit und den Eigenspannungspegel fest. Dies ist ein entscheidender Faktor, um sicherzustellen, dass Wärmedämmschichten für Triebwerke, verschleißfeste Beschichtungen für Gasturbinenschaufeln und korrosionsbeständige Beschichtungen für Hydraulikträger ihre geplante Lebensdauer erreichen. In der Hochdruckwasserstrahl- und Ultrapräzisionsbearbeitung ist sie die einzige Komponente, die über längere Zeiträume extrem hohem Druck standhält und dabei die geometrische Stabilität des Düsenkegels beibehält. Sie bestimmt direkt die Schnittfugenbreite, die Oberflächenrauheit und die Materialausnutzung. In der Laserauftragschweiß- und additiven Fertigungstechnik bestimmen die Innenwandglätte und die Dimensionsstabilität der koaxialen Pulverzuführungsdüse die Pulverausnutzung, die Schmelzbadstabilität und die Formgenauigkeit im Einzeldurchgang. Sie ist eine Schlüsselkomponente für die „Ersatz durch Schrott“-Lösung bei der Reparatur großer Kernkraftwerkskomponenten und der Wiederaufbereitung schwer zerspanbarer Luft- und Raumfahrtteile.

In Kraftstoffeinspritz- und Präzisionszerstäubungsanlagen gewährleisten Düsen aus Wolframlegierungen dank ihrer extrem hohen Beständigkeit gegen Kavitation und Hochtemperaturoxidation, dass sich die Düsenöffnung im Common-Rail-System über Zehntausende von Stunden nicht ausdehnt. Dies führt zu einer vollständigeren Verbrennung und saubereren Emissionen. In Plasmaerzeugungs- und Vakuumbeschichtungsanlagen dienen sie sowohl als Düsenkeil für die Lichtbogenführung und Plasmabeschleunigung als auch als Hauptträger der Elektrodenmaterialien und bestimmen somit direkt die Beschichtungsgleichmäßigkeit und die Produktionszykluszeit. Diese strategische Positionierung, bei der „eine einzelne Änderung das Ganze beeinflusst“, hebt die Forschung, Entwicklung, Fertigung und das Lieferkettenmanagement von Wolframlegierungsdüsen auf eine Ebene, die der des Hauptgeräteherstellers (OEM) gleichwertig ist. Führende Anwender schließen häufig

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

langfristige strategische Partnerschaften oder betreiben sogar gemeinsame Labore mit ihren Lieferanten, um sicherzustellen, dass Materialformulierungen, Strömungskanaldesign und Oberflächentechnik weltweit führend bleiben.

1.4.2 Typische Anwendungsszenarien von Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen bilden eine klar definierte und hochspezialisierte Kategorie von Anwendungsfällen, wobei jede Kategorie spezifischen Arbeitsbedingungen und speziellen Konstruktionswegen entspricht.

Thermisches Spritzen und Oberflächentechnik stellen den größten und ausgereiftesten Markt dar und umfassen Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF), Plasmaspritzen (APS), Kaltspritzen und Hochgeschwindigkeits-Lichtbogenspritzen. Die Düsen bestehen hauptsächlich aus Wolfram-Nickel-Eisen (Laval-Struktur) und zeichnen sich durch hohe Beständigkeit gegen Partikelerosion bei hohen Temperaturen und Temperaturschocks aus. Die Lebensdauer einer einzelnen Düse bestimmt die Chargenkonsistenz der Beschichtung. Anwendungen im Bereich Hochdruckwasserstrahlen und Ultrapräzisionsbearbeitung umfassen Reinstwasserschneiden, Abrasivwasserstrahlschneiden, Entrostung von Schiffen und Dekontamination von Kernkraftwerken. Die Düsen sind hauptsächlich vom Typ Wolfram-Nickel-Kupfer (Venturi) und mit DLC- oder Borierungsschichten kombiniert, um einen doppelten Schutz gegen Kavitation und Korrosion unter extrem hohem Druck zu erreichen.

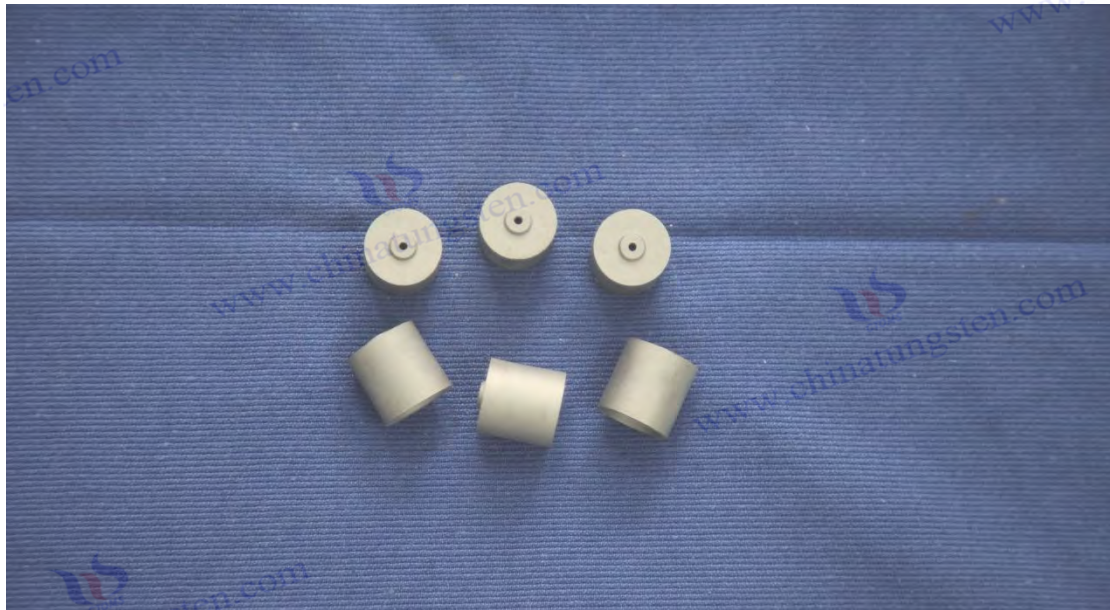
Laserauftragschweißen und additive Fertigung nutzen hauptsächlich koaxiale Pulverzuführungsdüsen und Seitenwellendüsen. Diese erfordern extrem glatte Innenwände, antihafbeschichtetes Pulver und Beständigkeit gegen Laserreflexion. Wolfram-Nickel-Kupfer- oder Wolfram-Kupfer-basierte Düsen sind die gängigsten Werkstoffe und werden häufig zur Reparatur hochwertiger Bauteile in der Kernenergie-, Luft- und Raumfahrt- sowie Bergbauindustrie eingesetzt. Anwendungen in der Brennstoff- und Gaszerstäubung und -verbrennung umfassen Common-Rail- Düsen für Diesel, Kerosin für die Luftfahrt und Zerstäubungsdüsen für Industriekessel. Hierbei sind Beständigkeit gegen Hochtemperatur-Oxidation, Kohlenstoffablagerungen und eine hohe Zerstäubungsqualität entscheidend. Wolfram-Nickel-Eisen- oder mit Seltenerdmetallen dotierte, verstärkte Düsen kommen häufig zum Einsatz.

Industrielle Reinigungs- und Oberflächenvorbehandlungsverfahren umfassen die Entfernung von Rost, Farbe und Oxidschichten mittels Hochdruckwasser, vorwiegend mit Laval- oder Fächerdüsen aus Wolfram-Nickel-Kupfer mit Schnellwechselsystem. Ziel ist eine extrem hohe Betriebseffizienz bei minimalem Wartungsaufwand. Plasmaerzeugung und Vakuumbeschichtung umfassen Plasmaspritzpistolen-Elektrodendüsen, Vakuumplasma-Reinigungsdüsen und PVD-Lichtbogenquellendüsen. Diese erfordern eine hohe Wärmeleitfähigkeit, Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion und nichtmagnetische Eigenschaften und verwenden häufig Wolfram-Kupfer- oder Wolfram-Nickel-Kupfer-Systeme.

Präzisionszerstäubung und Pulverpräparation umfassen Anwendungen wie die Sprühtrocknung von Arzneimitteln, die Zerstäubung von Metallpulvern und die Zerstäubung von Duftstoffen. Diese

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verfahren erfordern extrem feine Partikelgrößen und enge Verteilungen. Daher ist eine Tröpfchenkontrolle im Submikrometerbereich notwendig, die durch hochpräzise Wolframlegierungsdüsen mit ultrapräzisen Düsenhälsen erreicht wird. Obwohl sich diese Anwendungsfälle hinsichtlich ihrer Betriebsbedingungen stark unterscheiden, gilt für alle ein gemeinsames Prinzip: Je komplexer der Prozess, desto höher die Leistungsanforderungen und desto geringer die Toleranz gegenüber Stabilität, desto höher die Penetrationsrate und desto unersetzlicher sind Wolframlegierungsdüsen. Sie haben sich still und leise in jede bahnbrechende High-End-Fertigungstechnologie integriert und sind zu einem unsichtbaren, aber entscheidenden Dreh- und Angelpunkt für den kontinuierlichen Fortschritt der industriellen Fähigkeiten geworden.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsdüsen
Kapitel 2 : Aufbau von Wolframlegierungsdüsen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.1 Wichtigste Strukturelemente von Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen können in ihrer Form stark variieren, ihre Kernaufgabe bleibt jedoch dieselbe: die effiziente, stabile und kontrollierbare Umwandlung von Druck-, Wärme- oder elektrischer Energie aus dem Zulauf in einen gerichteten Hochgeschwindigkeitsstrahl. Dies erfordert ein hochkomplexes und miteinander verbundenes System von Strukturelementen: ein Einlasssystem zur Strömungsstabilisierung, einen sich verjüngenden Beschleunigungsabschnitt, einen Energieumwandlungskern im engsten Querschnitt, einen Expansions- und Gleichrichterabschnitt, eine Formschnittstelle mit Kühlsystem, eine funktionelle Oberflächenschicht sowie Strukturen zum Schutz vor Spritzern und Vibrationen. Jedes dieser Elemente ist unverzichtbar und bestimmt direkt die Strahlgeschwindigkeit, den Divergenzwinkel, die Strömungsstabilität, die Erosionsbeständigkeit, die Lebensdauer und die Kompatibilität mit dem Trägersystem. Die hohe Dichte, Härte, Zähigkeit und der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient der Wolframlegierung sind präzise in diese Strukturelemente integriert. Dadurch erreicht die Düse sowohl eine extrem hohe Energieumwandlungseffizienz als auch eine extrem lange Formstabilität selbst unter extremsten Betriebsbedingungen.

2.1.1 Grundaufbau einer Wolframlegierungsdüse: Einlass, Strömungskanal und Auslass

Eine Düse aus Wolframlegierung lässt sich in drei Funktionsmodule unterteilen: Einlass, Strömungskanal und Auslass. Jedes Modul erfordert jedoch ein extrem hohes Maß an Konstruktions- und Fertigungskompetenz.

Der Einlassbereich ist die einzige Schnittstelle zwischen Düse und vorgelagerter Energiequelle. Seine Hauptaufgabe besteht darin, die einströmende Strömung, die Turbulenzen, Wirbel oder Druckpulsationen enthalten kann, schnell in eine gleichmäßige, laminare oder nahezu laminare Strömung umzuwandeln und gleichzeitig die Einlassverluste zu minimieren. Wolframlegierungsdüsen zeichnen sich typischerweise durch einen sich gleichmäßig erweiternden oder aufweitenden Einlass mit Leitschaufeln aus. Die Innenwand ist hochglanzpoliert und weist eine extrem hohe Koaxialität auf, um Grenzschichtablösung und Wirbelstraßenbildung zu unterdrücken. Bei Überschall-Flammspritzdüsen und Hochdruckwasserstrahldüsen ist im Einlass häufig eine poröse Druckstabilisierungskammer oder ein Wabengleichrichter integriert, um Druckschwankungen weiter auszugleichen und eine gleichmäßige Strömung im engsten Querschnitt zu gewährleisten. Die hohe Dichte der Wolframlegierung und ihre inhärente Massenträgheit spielen hierbei eine entscheidende Rolle. Sie sorgen dafür, dass der Einlassbereich unter Hochgeschwindigkeitsrückstoß nahezu keine Mikrovibrationen erfährt und somit die langfristige Stabilität der Strahlrichtung von der Quelle aus gewährleistet wird.

Der Strömungskanal ist das Herzstück der gesamten Düse und gliedert sich funktionell in Konvergenzbereich und Düsenhals. Der Konvergenzbereich nutzt eine glatte, stetige Kurve (üblicherweise ein Polynom fünften Grades oder eine logarithmische Spirale), um statische Druckenergie effizient in kinetische Energie umzuwandeln. Der extrem niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient und die extrem hohe Dimensionsstabilität der Wolframlegierung gewährleisten, dass sich die Kontur des Konvergenzbereichs auch unter hohen Temperaturen oder extrem hohem Druck kaum verformt. Dies

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ermöglicht die präzise Gestaltung des Beschleunigungsgradienten. Der Düsenhals ist der kleinste Querschnitt und die Stelle der Schallfläche der Überschalldüse. Sein Durchmesser und seine Rundheit bestimmen direkt die endgültige Strahlgeschwindigkeit und den Massenstrom. Der Düsenhals von Wolframlegierungsdüsen wird typischerweise durch eine Kombination aus integraler Umformung, Präzisionsschleifen und Laserbearbeitung hergestellt. Dadurch wird sichergestellt, dass Durchmessertoleranzen und Rundheitsfehler im Mikrometerbereich liegen und die Oberflächenrauheit spiegelglatt ist. Dies reduziert den Strömungswiderstand und das Turbulenzgeräusch auf theoretische Grenzwerte. Gleichzeitig ist der Düsenhals der Bereich, der am stärksten von Erosion, Kavitation, Thermoschock und Oxidation betroffen ist. Die kombinierten Eigenschaften der Wolframlegierung – hohe Härte, hohe Zähigkeit und Beständigkeit gegen Hochtemperaturerweichung – ermöglichen es ihr, ihre ursprüngliche Geometrie selbst nach Zehntausenden von Partikeleinschlägen oder Tausenden von Stunden Hochtemperatur-Flammenerosion beizubehalten und übertreffen damit jedes herkömmliche Material bei Weitem.

Bei Unterschalldüsen dient der Austrittsbereich primär der Druckreduzierung und Gleichrichtung. Bei Überschalldüsen fungiert er als Laval-Expansionsabschnitt und beschleunigt den bereits überschalligen Luftstrom im engsten Querschnitt auf das Zwei- bis Dreifache der Schallgeschwindigkeit, während er gleichzeitig den Divergenzwinkel und die Geschwindigkeitsgleichmäßigkeit des Strahls steuert. Die Innenwand des Expansionsbereichs von Wolframlegierungsdüsen ist hochglanzpoliert und entspricht exakt der isentropen Expansionskurve; selbst kleinste Unebenheiten können Stoßwellen erzeugen, die zu Energieverlusten und Strahldivergenz führen. Die Austrittsendlfläche ist häufig scharfkantig oder dünnwandig abgeschrägt, um Turbulenzen zu reduzieren und die Ansammlung von geschmolzenen Partikeln oder Tröpfchen sowie die Bildung von Knötchen zu verhindern. Einige High-End-Düsen verfügen zudem über einen Luftschleier oder Kühlring am äußeren Austrittsrand, um Oxidation und Divergenz durch die Aufnahme von Umgebungsluft durch den Strahl weiter zu minimieren.

Die drei Hauptmodule – Einlass, Strömungskanal und Auslass – sind integral geformt oder präzise zu einer hochsteifen Einheit zusammengefügt. Dabei werden die hohe Festigkeit und die präzise Bearbeitbarkeit der Wolframlegierung genutzt. Dies gewährleistet, dass der interne Strömungskanal seine vorgesehene Form auch unter enormen axialen Reaktionskräften, radialen thermischen Spannungen und Vibrationsbelastungen beibehält. Diese hohe Formgenauigkeit vom Einlass bis zum Auslass ist die grundlegende Garantie für einen langfristig stabilen, effizienten und präzisen Strahlausstoß von Wolframlegierungsdüsen und stellt einen entscheidenden Unterschied dar, den Düsen aus herkömmlichen Materialien nicht bieten können.

2.1.2 Strukturparameter von Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen sind die zentralen Variablen, die Strahlgeschwindigkeit, Strömungseigenschaften, Divergenzwinkel, Energieeffizienz und die Lebensdauer der Düse bestimmen. Diese Parameter werden nicht willkürlich festgelegt, sondern durch präzise Berechnungen, Simulationsiterationen und umfangreiche experimentelle Überprüfung auf Basis der Strömungsmechanik, Materialtoleranzen und spezifischer Prozessziele ermittelt. Die hohe Festigkeit,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Härte, geringe Wärmeausdehnung und ausgezeichnete Bearbeitbarkeit von Wolframlegierungen ermöglichen die exakte Umsetzung dieser theoretisch optimalen Parameter in die physikalische Form mit höchster Präzision. Dadurch wird ein nahezu ideales Strömungsfeld und eine maximale Formstabilität unter realen Betriebsbedingungen erreicht.

2.1.2.1 Düsenparameter von Wolframlegierungsdüsen

Die Düsenparameter umfassen im Wesentlichen das optimale Verhältnis zwischen Einlassdurchmesser, minimalem Düsenhalsdurchmesser und Auslassdurchmesser. Der Düsenhalsdurchmesser ist dabei die kritischste und empfindlichste Regelgröße. Er bestimmt direkt den Massenstrom, das kritische Druckverhältnis und die Endstrahlgeschwindigkeit und ist gleichzeitig der Bereich der Düse, der am stärksten von Erosion, Kavitation und Thermoschock betroffen ist. Bei der Wahl des Düsenhalsdurchmessers muss ein optimales Gleichgewicht zwischen den Prozessanforderungen (wie Schnittdicke, Beschichtungsrate und Reinigungsbreite) und der Materialtoleranz gefunden werden: Ein zu kleiner Durchmesser führt zu unzureichendem Durchfluss, zu hohem Druck und verstärkter Kavitation; ein zu großer Durchmesser hingegen zu geringerer Strahlgeschwindigkeit, reduzierter Energieausnutzung und zu ungleichmäßiger Erosionsverteilung.

von Düsen aus Wolframlegierungen erfolgt typischerweise durch integrales Umformen mit anschließendem Präzisionsinnenschleifen, Honen oder Strömungspolieren. Rundheit, Zylindrizität und Oberflächenrauheit erreichen Mikrometer- oder sogar Submikrometerbereich und übertreffen damit die Bearbeitungsgrenzen herkömmlicher Werkstoffe deutlich. Dieser extrem präzise Düsenhals gewährleistet eine sehr gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung des Strahls über den gesamten Querschnitt und verhindert so frühzeitige Kavitationsgruben und eine durch lokale Überdrehzahl verursachte Vergrößerung der Düsenöffnung. Gleichzeitig verleihen die hohe Dichte und Zähigkeit von Wolframlegierungen dem Düsenhals eine außergewöhnliche Verformungsbeständigkeit. Selbst bei längerer Einwirkung von Ultrahochdruck-Wasserstrahlen oder Hochgeschwindigkeits-Luftströmen mit harten Partikeln ändert sich der Düsenhalsdurchmesser extrem langsam. Dies gewährleistet eine gleichbleibende Strahlparameterqualität und Prozessstabilität über Tausende von Stunden.

Das Verhältnis von Einlassdurchmesser zu Düsenhalsdurchmesser bestimmt die Druckrückgewinnung und das Risiko von Strömungsablösungen im Verengungsbereich. Das Verhältnis von Auslassdurchmesser (dem Durchmesser am Ende des Expansionsbereichs bei Überschalldüsen) zu Düsenhalsdurchmesser bestimmt hingegen das Expansionsverhältnis und die resultierende Mach-Zahl. Wolframlegierungsdüsen werden durch hochpräzise CNC-Bearbeitung und optische Online-Messung so gefertigt, dass die Verhältnisse dieser drei Komponenten exakt den Auslegungswerten entsprechen. Dadurch lassen sich Position und Intensität der Stoßwelle sowie die Länge des Strahlkernbereichs präzise steuern. Diese extreme Kontrolle der Düsenparameter ist die Grundlage dafür, dass Wolframlegierungsdüsen extrem hohe Partikelgeschwindigkeiten beim thermischen Spritzen, extrem schmale Spalten beim Wasserstrahlen und extrem feine Pulverbündel bei der Pulverzuführung ermöglichen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.1.2.2 Kegelwinkelparameter von Wolframlegierungsdüsen

Die Kegelwinkelparameter beziehen sich hauptsächlich auf die Kegelwinkel der Verengungs- und Erweiterungsabschnitte, die gemeinsam den Strömungsbeschleunigungsgradienten, die Stoßwellenstruktur und die Strahldivergenz bestimmen. Der Verengungskegelwinkel beeinflusst die Effizienz der Umwandlung von Druckenergie in kinetische Energie und die Tendenz zur Grenzschichtablösung vom Einlass bis zum engsten Querschnitt; der Erweiterungskegelwinkel bestimmt die Expansionsgleichmäßigkeit der Überschallströmung, die Stoßwellenintensität und die Austrittsgeschwindigkeitsverteilung. Ein zu großer Verengungswinkel führt zu Strömungsablösung und Energieverlusten, während ein zu kleiner Winkel eine zu lange Düse und konzentrierte Wärmebelastung zur Folge hat. Ein zu großer Erweiterungswinkel erzeugt eine übermäßige Stoßwellenexpansion und Strahldivergenz, während ein zu kleiner Winkel zu unzureichender Expansion und einer Unterausnutzung des Geschwindigkeitspotenzials führt.

Wolframlegierungsdüsen werden typischerweise auf Basis der eindimensionalen isentropen Strömungstheorie in Kombination mit dreidimensionaler CFD-Simulationsoptimierung entwickelt. Durch hochpräzise Fünf-Achs-Bearbeitung und Laserscanning-Inspektion wird die Abweichung des Innenkegelprofils minimiert. Der extrem niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient und die hohe Dimensionsstabilität von Wolframlegierungen bei hohen Temperaturen gewährleisten, dass der Kegelwinkel über einen gesamten Betriebstemperaturbereich von Raumtemperatur bis zu mehreren tausend Grad Celsius nahezu unverändert bleibt. Dies garantiert die langfristige Vorhersagbarkeit der Stoßwellenposition und der Strahlstruktur. Insbesondere bei Überschall-Flammspritz- und Kaltspritzdüsen können selbst geringfügige Abweichungen des Kegelwinkels im Expansionsbereich zu erheblichen Streuungen der Partikelgeschwindigkeit und der Temperaturverteilung führen. Die Bearbeitungspräzision und die Materialstabilität von Wolframlegierungsdüsen minimieren diese Streuung und gewährleisten so höchste Beschichtungsdichte und Haftfestigkeit.

Darüber hinaus nutzen Düsen aus Wolframlegierungen häufig variable Kegelwinkel oder Mikrostrukturen im Expansionsbereich, um die Grenzschichtablösung weiter zu unterdrücken, die Geschwindigkeitsgleichmäßigkeit zu optimieren und das Geräusch zu reduzieren. Die Realisierung dieser komplexen Kegelwinkelkurven beruht vollständig auf der hervorragenden Präzisionsbearbeitung und der hohen Steifigkeit von Wolframlegierungen.

2.1.2.3 Längenparameter von Wolframlegierungsdüsen

Die Länge ist die dritte Dimension bei der Auslegung von Wolframlegierungsdüsen und ebenso wichtig wie Düsendurchmesser und Kegelwinkel. Sie umfasst die Länge des Verengungsbereichs, die Länge des geraden Düsenabschnitts, die Länge des Erweiterungsbereichs und die Gesamtlänge der Düse. Die Längenauslegung ist nicht einfach eine Frage willkürlicher Verlängerung oder Verkürzung, sondern das Ergebnis der Wechselwirkung mehrerer Bereiche wie Strömungsmechanik, Wärmeleitung und Spannungsverteilung. Ein zu kurzer Verengungsbereich führt dazu, dass die Strömung in den Düsenhals eintritt, bevor sie sich vollständig ausgebildet hat, was zu Ablösewirbeln und Energieverlusten führt. Ein

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zu kurzer Erweiterungsbereich führt zu unzureichender Expansion und unvollständiger Freisetzung des Geschwindigkeitspotenzials. Ein zu langer Erweiterungsbereich führt zu erhöhten Reibungsverlusten und akkumulierter Wärmebelastung, wodurch die Stoßwellenstruktur unkontrolliert wird. Die Länge des geraden Düsenabschnitts bestimmt direkt, ob die Schalloberfläche stabil ist und ob vorzeitig Stoßwellen entstehen.

Wolframlegierungen ermöglichen die Einhaltung dieser theoretisch optimalen Längen mit millimetergenauer Präzision über einen extremen Temperaturbereich von Raumtemperatur bis zu Tausenden von Grad Celsius und von Atmosphärendruck bis zu Hunderten von Megapascal. Düsen aus herkömmlichen Materialien unterliegen unter hohen Temperaturen oder hohem Druck häufig einer Längenänderung aufgrund von thermischer Verformung oder plastischer Verformung, wodurch das sorgfältig ausgelegte Strömungsfeld abrupt zusammenbricht. Wolframlegierungsdüsen hingegen behandeln Längenparameter als echte Konstanten. Bei Überschall-Flammspritzdüsen bestimmt die Länge des Expansionsabschnitts, ob die Verweilzeit der Partikel in der Hochtemperatur-Hochgeschwindigkeitszone den optimalen Schmelzzustand erreicht; bei Hochdruck-Wasserstrahldüsen bestimmt die Länge des geraden Abschnitts im engsten Querschnitt, ob der Kollaps der Kavitationsblase weit vom empfindlichsten Einlass entfernt ist; bei Laser-Pulverförderdüsen bestimmt die Abstimmung der Gesamtlänge auf die Pulver-Gas-Mischkammer, ob der Pulverstrahl präzise im Laserfokuspunkt fokussiert wird. Es ist gerade die extrem lange Lebensdauer und die gleichbleibende Längenstabilität von Wolframlegierungen, die das Zeitfenster dieser kritischen Prozesse von „zehn Minuten“ auf „tausende Stunden“ erweitert und damit den Sprung vom Labor zur Industrialisierung vollzieht.

2.1.2.4 Kollaboratives Design von Wolframlegierungsdüsen unter Berücksichtigung mehrerer Parameter

Moderne Wolframlegierungsdüsen haben die Ära der groben Anpassung einzelner Parameter längst hinter sich gelassen und befinden sich nun in einer Phase globaler, kollaborativer Optimierung, die sieben Dimensionen integriert: Öffnung, Kegelwinkel, Länge, Oberflächenrauheit, Halsrundheit, Materialzusammensetzung und Oberflächenbeschichtung. Der Designprozess beginnt typischerweise mit der Erstellung eines initialen Rahmens mithilfe der eindimensionalen isentropen Strömungstheorie. Darauf folgt die präzise Erfassung der Grenzschicht- und Stoßwelleninteraktion mittels dreidimensionaler viskoser CFD, die anschließende Überprüfung der Hochtemperaturverformung und Spannungsverteilung mit der thermisch-strukturell gekoppelten Finite-Elemente-Methode und schließlich der Einsatz von Topologieoptimierung und maschinellem Lernen zur globalen Optimierung Tausender Parameterkombinationen, bis eine optimale Geometrie gefunden ist, die bei gegebener Leistung und Partikel- oder Tropfengröße die höchste Strahlgeschwindigkeit, den kleinsten Divergenzwinkel, die niedrigste Wärmestromdichte an der Halswand und die längste Gesamtlebensdauer erzielt. Nur Wolframlegierungen ermöglichen solch komplexe, kollaborative Konstruktionsergebnisse: Sie erlauben es Konstrukteuren, extrem schlanke Querschnittsverhältnisse, ultradünne Wandstärken, konische Oberflächen mit variabler Krümmung und Mikrostrukturen an der Innenfläche zu realisieren und dabei alle Merkmale im Mikrometerbereich über Tausende von Betriebsstunden zu erhalten. Das Ergebnis: Dieselbe Düse kann die Partikelgeschwindigkeit um eine Größenordnung erhöhen, die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schnittfugenbreite beim Wasserstrahlschneiden um fast die Hälfte reduzieren, die Pulverausnutzung um mehr als 30 % steigern und die Lebensdauer einer einzelnen Düse um das Fünf- bis Zehnfache verlängern – und das alles bei gleichem Energieverbrauch. Diese Konstruktionsrevolution, vom Versuch-und-Irrtum-Prinzip zur präzisen Vorhersage, ist die treibende Kraft hinter der anhaltend führenden Leistung von Wolframlegierungsdüsen und der unbesungene Held hinter der ständigen Erweiterung der Grenzen in High-End-Fertigungsprozessen.

2.1.3 Strukturtypen von Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen lassen sich in acht Hauptbaugruppen unterteilen: Düsen mit geradem Loch, Venturi-Düsen, Laval-Düsen mit variablem Querschnitt, mehrstufige Laval-Düsen, koaxiale Pulverzuführungsdüsen, Mehrloch-Ablenkdüsen und fächerförmige/flache Düsen. Jede Baugruppe ist für eine bestimmte Strahlform und einen spezifischen Anwendungsbereich ausgelegt. Alle Baugruppen basieren auf der hohen Präzision und der langen Lebensdauer von Wolframlegierungen.

2.1.3.1 Gerade Wolframlegierungsdüse

Gerade Wolframlegierungsdüsen sind zwar am einfachsten aufgebaut, aber am schwierigsten herzustellen. Ihre Strömungskanäle bestehen aus zylindrischen Bohrungen mit konstantem Durchmesser oder nur geringfügiger Verjüngung, ohne erkennbare Verengungs- und Erweiterungsstrukturen. Sie erzeugen direkt durch den hohen Vordruck einen Hochgeschwindigkeitsstrahl. Typische Anwendungen sind Reinstwasser-Schneiddüsen mit extrem hohem Druck, Common-Rail- Düsen für Dieselmotoren, einige Niederdruck-Plasma-Reinigungsdüsen und fächerförmige Hochdruck -Reinigungsdüsen.

Die scheinbar einfache gerade Düse stellt höchste Anforderungen an Material und Fertigungsprozesse: Der Düsendurchmesser darf sich über Zehntausende von Stunden nicht ausbeulen, die Innenwand muss spiegelglatt sein und darf keine Kavitationsgruben bilden, und die Stimfläche muss scharfkantig und exakt senkrecht zur Achse sein; andernfalls divergiert, weicht der Strahl sofort ab oder wird diskontinuierlich. Wolframlegierungen, insbesondere das Wolfram-Nickel-Kupfer-System, haben sich aufgrund ihrer unübertroffenen Beständigkeit gegen Kavitation und Korrosion, ihrer hohen Zähigkeit und Dimensionsstabilität als Standard für gerade Düsen etabliert. Die Fertigung erfolgt durch eine Kombination aus Kaltisostatpressen, mehrstufigem Tieflochbohren, Diamanthonen, Fließpolieren und Laserpräzisionsbearbeitung, wodurch Toleranzen für Düsendurchmesser, Zylindrizität und Oberflächenrauheit im Mikrometer- oder sogar Submikrometerbereich erreicht werden.

Im Bereich des Reinstwasser-Hochdruckschneidens gewährleisten geradlinige Wolframlegierungsdüsen, dass Schnittfugenbreite und Oberflächengüte auch nach Tausenden von Betriebsstunden konstant bleiben. In Common-Rail- Systemen für Dieselmotoren garantieren sie, dass sich die Düsenöffnung weder verkohlt noch ausdehnt und somit ein optimales Luft-Kraftstoff-Verhältnis erhalten bleibt. Bei der Hochdruckreinigung von Schiffen und Windkraftanlagenflügeln haben geradlinige, fächerförmige Wolframlegierungsdüsen mit ihrer extrem hohen Gleichmäßigkeit der Aufprallkraft und dem minimalen Wartungsaufwand die Effizienz und Sicherheit im Offshore-Bereich grundlegend verändert. Geradlinige

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframlegierungsdüsen vereinen höchste Zuverlässigkeit mit maximaler Einfachheit und stellen damit einen klassischen Erfolg für Wolframlegierungen in der anspruchsvollsten Anwendungssituation dar.

2.1.3.2 Konische Wolframlegierungsdüse

Konische Wolframlegierungsdüsen, auch Venturi- oder Einkegel-Konvergenzdüsen genannt, zeichnen sich durch einen sich kontinuierlich verjüngenden, konischen Strömungsweg vom Einlass zum Auslass aus. Sie besitzen weder einen engsten Querschnitt noch einen Expansionsabschnitt, wodurch der Strahl seine maximale Geschwindigkeit direkt am Auslass erreicht. Diese Bauweise findet vorwiegend Anwendung bei Hochdruck-Wasserstrahldüsen für abrasive Verfahren, Überschall-Kaltgasdüsen und bestimmten Vorbeschleunigungsabschnitten beim Plasmaspritzen. Die konische Formgebung gewährleistet eine konstante Strömungsbeschleunigung, verringert kontinuierlich die Dicke der Grenzschicht und minimiert Reibungsverluste sowie Ablöserisiken. Darüber hinaus prädestinieren die extrem kompakte Bauweise, der relativ einfache Herstellungsprozess und die außergewöhnlich hohe mechanische Festigkeit diese Düsen für Anwendungen mit extrem hohem Druck und starkem Rückstoß.

Die Vorteile von Wolframlegierungen in konischen Düsen liegen auf der Hand: Die hohen Anforderungen an die Präzision und den Umfang kontinuierlicher konischer Oberflächen lassen sich nur durch die hohe Steifigkeit und präzise Schleifbarkeit von Wolframlegierungen erfüllen. Weicht der Kegelwinkel aufgrund von thermischer Verformung oder Verschleiß vom Sollwert ab, brechen Strahlgeschwindigkeit und Fokussierungseigenschaften sofort ein. Der extrem niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient und die Erosionsbeständigkeit von Wolframlegierungen hingegen sorgen dafür, dass das Kegelprofil über Tausende von Stunden unverändert bleibt. Insbesondere beim Abrasivwasserstrahlschneiden müssen konische Wolframlegierungsdüsen der doppelten Belastung durch Hochdruckwasserschläge und Granatpartikel standhalten. Herkömmliche Hartmetalldüsen weisen oft nach wenigen hundert Stunden eine verbreiterte Schnittfuge und Aufweitung auf, während Wolframlegierungsdüsen einen nahezu konstanten Kegelwinkel und Austrittsdurchmesser beibehalten. Dadurch erreichen Schnittgenauigkeit und Standzeit der Saphirdüse gleichzeitig höchste Werte. Im Kaltgas-Vorbeschleunigungsbereich sorgt die konische Wolframlegierungsdüse mit ihrer extrem hohen Oberflächengüte und Dimensionsstabilität für eine gleichmäßige Anfangsgeschwindigkeitsverteilung der Partikel vor dem Eintritt in den Heizbereich und schafft so die optimale Grundlage für den nachfolgenden Überschallaufprall.

2.1.3.3 Fächerförmige Wolframlegierungsdüse

Schlitzdüsen, auch Flachschrütdüsen oder Schmalschrütdüsen genannt, besitzen einen nicht kreisförmigen, sondern einen schmalen, rechteckigen oder elliptischen Auslass. Der Strahl bildet eine dünne, breite, fächerförmige Oberfläche. Schlitzdüsen werden hauptsächlich für die großflächige Hochdruckreinigung, das kontinuierliche Entzünden von Stahlplatten, die Reinigung von Papierdraht in Papierfabriken, die Vorbehandlung von Lackierungen in der Automobilindustrie und das Spülen von Oberflächen in der Lebensmittelverarbeitung eingesetzt. Die größte Herausforderung bei Schlitzdüsen besteht darin, gleichzeitig eine gleichmäßige Aufprallkraft, eine stabile Abdeckungsbreite, nicht

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

divergierende Kanten und eine extrem hohe Verstopfungsresistenz in einem extrem dünnen Schlitzauslass zu erzielen. Diese Anforderungen werden fast ausschließlich durch die Materialeigenschaften bestimmt.

Wolframlegierungen, insbesondere das Wolfram-Nickel-Kupfer-System, ermöglichen dank ihrer extrem hohen Festigkeit und Kavitationsbeständigkeit extrem dünne Schlitzaustrittswände ohne Einsturz oder Verformung. Spiegelglänzende Innenwände und scharfe Austrittskanten gewährleisten einen präzisen, gleichmäßigen Überlappungsprozess ohne „Katzenohren“-Phänomen (dick in der Mitte, dünn an den Rändern). Die hervorragende Korrosionsbeständigkeit verhindert Lochfraß und Spaltkorrosion in aggressiven chemischen Umgebungen wie Beizanlagen, alkalischen Waschanlagen und bei der Entrostung mit Meerwasser. Die Fertigung erfolgt typischerweise in einem kombinierten Verfahren: Präzisions-Drahterodieren zur Schlitzformung, mehrachsiges CNC-Schleifen zur Bearbeitung der Schneidkante und Fließpolieren zur Politur der Innenwand. Schlitzbreitentoleranzen und Parallelität erreichen den Mikrometerbereich und übertreffen damit die Bearbeitungsgrenzen von Edelstahl und Hartmetall deutlich.

Im Bereich der Hochdruckreinigung von Schiffen und Offshore-Windparks steigert die fächerförmige Wolframlegierungsdüse mit ihrer extrem hohen Gleichmäßigkeit der Aufprallkraft und der nahezu verstopfungsfreien Anwendung die Effizienz von Ein-Personen-Arbeiten um ein Vielfaches und revolutioniert so die Möglichkeiten der Rost- und Farbentfernung auf Offshore-Anlagen. Beim Entzundern vor dem Kaltwalzen von Stahl sorgt die fächerförmige Wolframlegierungsdüse für einen konstant hohen Entzunderungsgrad und reduziert so den nachfolgenden Säureeinsatz und die Säureemissionen deutlich. In Reinigungsanlagen der Lebensmittel- und Pharmaindustrie erfüllen ihre ungiftigen, desinfektionsmittelbeständigen und rostfreien Eigenschaften höchste Reinheitsanforderungen. Die fächerförmige Wolframlegierungsdüse erzielt die größte Abdeckung mit der dünnsten Schneidkante und dem schonendsten Aufprall selbst auf härteste Materialien und ist damit die optimale Lösung für großflächige, hocheffiziente und langlebige Reinigung.

2.1.3.4 Andere Wolframlegierungsdüsen mit spezieller Struktur

Neben den drei klassischen Bauformen – gerades Loch, konisch und fächerförmig – wurden für Wolframlegierungsdüsen auch zahlreiche Sonderbauformen für extreme oder komplexe Arbeitsbedingungen entwickelt, von denen jede einen weiteren Durchbruch in den Grenzen von Materialien und Prozessen darstellt.

Die koaxiale Pulverzuführungsdüse ist das Herzstück des Laserauftragschweißens und der additiven Fertigung. Sie ist als Ring-in-Ring-Konstruktion ausgeführt, bestehend aus einem äußeren Ring für Pulvergas, einem inneren Ring für Schutzgas und einem zentralen optischen Strahlengang. Die Wolframlegierung gewährleistet durch extrem hohe Koaxialität und glatte Innenwände die präzise Fokussierung des Pulverstrahls und verhindert das Anhaften von Partikeln. Dies ermöglicht die Stabilität des Schmelzbades und eine Formgenauigkeit im Mikrometerbereich in einem einzigen Arbeitsgang. Die Mehrloch-Split-Düse wird für das großflächige Flammsspritzen und die Mehrwegzerstäubung eingesetzt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dutzende bis Hunderte von Mikro-Laval- Löchern sind präzise auf derselben Stimfläche angeordnet. Dank ihrer hohen Dichte und Steifigkeit sorgt die Wolframlegierung dafür, dass sich der Lochabstand und die Ausrichtung der Anordnung auch nach Tausenden von Betriebsstunden nicht verändern.

Rotationsdüsen montieren Düsen aus Wolframlegierung auf einer schnell rotierenden Welle und ermöglichen so eine 360°-Reinigung oder -Beschichtung ohne tote Winkel. Sie werden häufig zur Rostentfernung in Rohrleitungen und zum Besprühen von Lagertanks eingesetzt. Die hohe Festigkeit und Verschleißfestigkeit von Wolframlegierungen verleihen ihnen unter Zentrifugalkraft eine geometrische Stabilität, die die jedes anderen Materials weit übertrifft. Hohl- und Vollkegeldüsen finden Anwendung in Kühltürmen, Rauchgasentschwefelungsanlagen und beim präzisen Versprühen von Kühlschmierstoffen. Wolframlegierungen gewährleisten dank ihrer Korrosions- und Ablagerungsbeständigkeit einen lang anhaltenden, gleichmäßigen und konstanten kegelförmigen Sprühnebel.

Zwei- oder Dreikanal-Verbunddüsen erreichen eine perfekte Koaxialität und Vermischung von Wasser, Abrasivmittel, Gas oder Pulver, Trägergas und Lichtstrahl innerhalb einer einzigen Wolframlegierungsdüse. Dies ist derzeit der komplexeste Strukturtyp und erfordert die umfassenden Eigenschaften von Wolframlegierungen, um die hohen Anforderungen an Koaxialität, thermische Stabilität und Erosionsbeständigkeit zu erfüllen. Diese speziell strukturierten Wolframlegierungsdüsen sind keine reinen Strahlgeneratoren mehr, sondern miniaturisierte Systeme, die multiphysikalische Kopplung, präzise Multimedia-Übertragung und den kollaborativen Betrieb mehrerer Prozesse integrieren. Sie erweitern die Leistungsgrenzen von Wolframlegierungen und heben die menschlichen Fähigkeiten in der Oberflächentechnik und Präzisionsfertigung auf ein neues Niveau. Jede einzigartige Struktur stellt eine präzise Reaktion von Wolframlegierungsmaterialien auf spezifische industrielle Herausforderungen dar und ist die perfekte Resonanz zwischen Materialwissenschaft und Ingenieurwesen.

2.1.4 Strukturelle Ableitungseigenschaften von Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen zeichnen sich nicht nur durch ihre Geometrie, sondern auch durch eine Reihe wichtiger Prozesseigenschaften aus, die sich aus ihrer präzisen und stabilen Struktur ergeben. Diese scheinbar „weichen“ Eigenschaften sind tatsächlich entscheidend für die Beschichtungsqualität, die Schnittgenauigkeit, die Zerstäubungspartikelgröße, die Reinigungseffizienz und die Wirtschaftlichkeit. Gerade weil Wolframlegierungen alle starren Strukturparameter wie Einlass, Strömungskanal, Auslass, Düsendurchmesser, Kegelwinkel und -länge auch unter extremen Betriebsbedingungen fixieren, verbessern sich weiche Indikatoren wie Strömungsstabilität, Zerstäubungsgleichmäßigkeit, Strahlrichtung und Energieausnutzung von „gelegentlich den Standard erfüllen“ zu „konstant den Standard erfüllen“.

2.1.4.1 Strömungsstabilität aufgrund der Strömungskanalstruktur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Strömungsstabilität ist für alle Spritzprozesse unerlässlich. Ob Pulverauftragsrate beim thermischen Spritzen, Schnittgeschwindigkeit von Hochdruckwasserstrahlen, Schichtdicke beim Laserauftragschweißen oder Kraftstoffeinspritzmenge bei Common-Rail -Systemen – kurz- oder langfristige Strömungsschwankungen führen direkt zu Qualitätseinbußen oder Prozessstörungen. Die nahezu perfekte Strömungsstabilität von Wolframlegierungsdüsen selbst unter extremsten Betriebsbedingungen beruht auf der hohen Präzision ihrer Strömungskanalstruktur im Material.

In klassischen Laval- oder Venturi-Strömungskanälen wird die Durchflussrate durch die Querschnittsfläche der engsten Stelle und die Stagnationsparameter stromaufwärts bestimmt. Theoretisch ist die Durchflussrate konstant, solange sich Durchmesser und Rundheit der engsten Stelle nicht ändern. Bei Düsen aus herkömmlichen Materialien kommt es unter dem Einfluss von Hochtemperatur-Partikelerosion, Hochdruckkavitation oder Thermoschock innerhalb weniger Minuten zu einer Erweiterung, Elliptisierung oder Oberflächenkorrosion der engsten Stelle. Dies führt zu einem kontinuierlichen Anstieg der Durchflussrate und zum Ausfall der Prozesssteuerung. Im Gegensatz dazu weisen Düsen aus Wolframlegierung mit ihrer extrem hohen Härte, Kavitationsbeständigkeit, Beständigkeit gegen Hochtemperaturerweichung und ihrem extrem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten über Tausende von Stunden eine nahezu unveränderte Querschnittsfläche der engsten Stelle auf und unterdrücken Strömungsschwankungen unterhalb der Nachweisgrenze. Gleichzeitig gewährleisten die spiegelglatte Innenwand und der präzise Kegelwinkel, dass die Grenzschicht im gewünschten Zustand bleibt und durch lokale Ablösewirbel verursachte Strömungsimpulse vermieden werden.

Beim Überschall-Flammspritzen äußert sich diese Strömungsstabilität direkt in einer hohen Übereinstimmung zwischen Partikelfluggeschwindigkeit und Temperaturverteilung, wodurch die Streuung der Beschichtungsporosität und Haftfestigkeit deutlich reduziert wird. Beim kontinuierlichen Hochdruckwasserstrahlschneiden gewährleistet sie eine durchgängig gleichmäßige Schnittfugenbreite und Oberflächenrauheit des gesamten Blechs vom ersten bis zum letzten Schnitt. Bei der Laserauftragschweißung über große Entfernungen kontrolliert sie die Schichtdickenschwankungen hunderter Meter Schweißnähte im Mikrometerbereich. Strömungsstabilität ist nicht länger nur eine Frage des „bestmöglichen Aufwands“, sondern eine „unvermeidliche“ Voraussetzung – ein grundlegendes Zeichen dafür, dass Wolframlegierungsdüsen sich von gewöhnlichen Verbrauchsmaterialien zu einem Kernbestandteil des Prozesses entwickelt haben.

2.1.4.2 Einfluss der Strukturgenauigkeit auf den Zerstäubungseffekt

Die Zerstäubung (Partikelgrößenverteilung, Partikelrundheit, räumliche Gleichmäßigkeit) ist das oberste Ziel von Prozessen wie der Kraftstoffeinspritzung, der Metallpulveraufbereitung, der Sprühtrocknung von Arzneimitteln, der Pulverzuführung beim Laserauftragschweißen und der thermischen Spritzzuführung. Die Zerstäubung wird nicht durch nachgelagerte Aufprall- oder Scherkräfte bestimmt, sondern durch die absolute Präzision der Düsenstruktur, die die ursprünglichen Tröpfchen bzw. das Pulver-Gas- Gemisch steuert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bei Common-Rail-Einspritzdüsen für Dieselmotoren und Gaszerstäubungsdüsen bestimmt die geometrische Präzision der Düsenöffnung bzw. des Düsen Schlitzes direkt den Ort des Flüssigkeitsfilmzerfalls und die Gleichmäßigkeit der Tropfentrennung. Wolframlegierungsdüsen mit ihren Toleranzen im Mikrometerbereich, ihrer Oberflächenrauheit im Submikrometerbereich und ihren scharfen, gratfreien Austrittskanten gewährleisten, dass die Flüssigkeitsfilmdicke optimal mit der Zerfallswellenlänge übereinstimmt. Dies führt zu einer extrem engen Tropfengrößenverteilung und einer extrem hohen Kugelform der Tropfen, was wiederum eine vollständigere Verbrennung, sauberere Emissionen und eine nahezu perfekte Pulverkugelform zur Folge hat. Beim koaxialen Pulverzuführungs-Laserauftragschweißen bestimmen die Koaxialität des ringförmigen Pulver- und Gaswegs, die Oberflächengüte der konischen Oberfläche und die Rundheit des Düsenhalses der Wolframlegierungsdüse den Fokussdurchmesser und die Dichteverteilung des Pulverstrahls. Jede noch so kleine Abweichung kann zu lokaler Überhitzung oder Pulvermangel im Schmelzbad führen. Die über Tausende von Stunden erreichte, driftfreie Strukturpräzision der Wolframlegierung gewährleistet, dass der Durchmesser des Fokussierflecks des Pulverstrahls perfekt mit dem Fokussierfleck des Lasers übereinstimmt, wodurch in einem einzigen Arbeitsgang eine Oberflächenwelligkeit auf Schmiedenniveau und eine innere metallurgische Qualität erreicht werden.

In der pharmazeutischen Sprühtrocknung und Duftstoffzerstäubung gewährleisten Zweistoff- oder Druckzerstäubungsdüsen aus Wolframlegierung mit ihren nicht expandierenden Düsenhälsen und nicht ablagernden Innenwänden eine absolut gleichmäßige Partikelgrößenverteilung über alle Chargen hinweg. Dies ermöglicht eine hochgradig reproduzierbare Beschichtungsrate und Freisetzungskurve pharmazeutischer Wirkstoffe. Beim Überschall-Flammspritzen und Kaltspritzen bestimmt die Fähigkeit der Strukturpräzision, die Gas-Feststoff-Zweiphasenströmung zu kontrollieren, die Gleichmäßigkeit von Partikelgeschwindigkeit und -temperatur. Diese wiederum beeinflusst die Beschichtungsdichte und die Verteilung der Eigenspannungen. Strukturpräzision ist somit keine Fertigungstoleranz mehr, sondern eine entscheidende Variable, die sich direkt auf die Leistung des Endprodukts auswirkt. Düsen aus Wolframlegierung wandeln „strukturelle Genauigkeit im Mikrometerbereich“ in „Zerstäubungskontrolle im Mikrometerbereich“ um und befreien Verfahrenstechniker von der Unsicherheit bezüglich der Chargenkonsistenz. Stattdessen erhalten sie deterministische Ergebnisse, die durch die perfekte Abstimmung von Material und Struktur erzielt werden.

2.2.1 Gängige Zusammensetzungsverhältnisse und Anwendungen von Wolframlegierungen für Düsen

Nach fast dreißig Jahren industrieller Optimierung hat sich das System der Wolframlegierungszusammensetzung für Düsen zu einem logisch stringenten, klar definierten und systematischen Standard entwickelt. Jedes Verhältnis ist keine zufällige Entdeckung im Labor, sondern eine systematische, optimale Lösung für Temperatur, Erosionsart, korrosives Medium, Magnetfeldumgebung, Anforderungen an die Wärmeleitfähigkeit und Kostenbeschränkungen. Gemeinsames Prinzip ist die Aufrechterhaltung eines hohen Wolframgehalts, um die Kontinuität des harten Gerüsts und die Verschleißfestigkeit zu gewährleisten. Gleichzeitig wird durch die präzise Steuerung von Art und Anteil der Bindemittelphase eine gezielte Leistungssteigerung in verschiedenen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dimensionen erzielt. So entsteht ein vollständiger Gradient von „Basis-Hochwolfram → Wolfram-Nickel-Eisen → Wolfram-Nickel-Kupfer → kundenspezifische Ausführungen“, der das gesamte Spektrum der Einsatzbedingungen von der konventionellen Reinigung bis hin zum extremen Plasmaspritzen abdeckt.

Die Genialität dieses Formulierungssystems liegt in der Umwandlung scheinbar widersprüchlicher Leistungsanforderungen in steuerbare Variablen: Um Härte und Erosionsbeständigkeit zu maximieren, wird der Wolframgehalt erhöht, während die Bindemittelphase minimiert wird; um Hochtemperaturfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit auszubalancieren, wird Nickel-Eisen-Bindemittel verwendet und das Eisen-Nickel-Verhältnis optimiert; für vollständige Nichtmagnetismus und Beständigkeit gegen stärkste Korrosion wird Nickel-Kupfer vollständig durch Nickel ersetzt; um bestehende Grenzen zu überwinden, werden Molybdän, Rhenium, Kobalt, Seltenerdelemente oder Zweitphasenpartikel zur Mikrolegierung hinzugefügt. Hinter jeder Formulierung stehen eine klare Fehleranalyse, langfristige industrielle Erprobung und eine ausgereifte Lieferkette. Dies stellt sicher, dass Ingenieure Materialien nicht mehr „annähernd“, sondern „grammgenau und optimal“ auswählen. Aus diesem Grund haben nahezu ausnahmslos führende globale Hersteller von Anlagen zum thermischen Spritzen, Wasserstrahlschneiden, Laserauftragschweißen, Common-Rail-Systemen und Plasmaanlagen dieses Formulierungssystem als alleinigen Standard für ihre Düsenmaterialien übernommen.

2.2.1.1 Grundrezeptur mit hohem Wolframgehalt (Wolframgehalt $\geq 90\%$)

Das hohe Wolframanteil-Basisverhältnis bildet die Grundlage und Obergrenze des gesamten Düsenmaterialsystems. Alle nachfolgenden, feineren Verhältnisse basieren darauf. Die zentrale Konstruktionsphilosophie besteht darin, den Wolframanteil maximal auszureizen und gleichzeitig eine dichte Sinterung zu gewährleisten. Dadurch bilden die Wolframpartikel ein durchgehendes oder nahezu durchgehendes Gerüst. Dies wiederum führt zu maximaler Härte, Verschleißfestigkeit, Beständigkeit gegen Hochtemperaturerweichung und Dimensionsstabilität. Düsen mit diesem Verhältnis zeigen selbst unter stärkster diamanthaltiger abrasiver Erosion oder einem plötzlichen Temperaturschock von 2000 °C nur eine sehr geringe plastische Verformung und nahezu keinen Massenverlust. Ihre Formstabilität übertrifft die jedes herkömmlichen Materials bei Weitem. Es ist die erste Wahl für Prozesse mit höchsten Anforderungen an Lebensdauer und Präzision, wie z. B. Überschallflammspritzen, Kalspritzen, Wasserstrahlspritzen und Laserpulverzuführung. Zudem dient es als Leistungsmaßstab für nachfolgende Wolfram-Nickel-Eisen- und Wolfram-Nickel-Kupfer-Verhältnisse.

2.2.1.2 Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungsanteile

Die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung kombiniert eine Nickel-Eisen-Bindemittelphase mit einem hochwolframhaltigen Gerüst und erzielt so ein optimales Verhältnis von Festigkeit, Zähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen. Sie ist derzeit die Standardlösung für Hochtemperatur- und Hochgeschwindigkeitsanwendungen im Bereich der Gas-Feststoff-Zweiphasenströmung und hält einen Marktanteil von über 90 % beim Überschallflammspritzen, Plasmaspritzen, Hochgeschwindigkeits-Lichtbogenspritzen und bei Gasturbinen-Brennkammerdüsen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Nickel-Eisen-Bindemittelphase zeichnet sich durch eine hervorragende Benetzbarkeit der Wolframpartikel bei hohen Temperaturen und eine extrem hohe Grenzflächenhaftung aus. Gleichzeitig verbessert die gezielte Zugabe von Eisen die Wärmeleitfähigkeit und die Hochtemperaturfestigkeit signifikant. Dadurch kann die Düse Wärme schnell ableiten, ohne sich bei Dauertemperaturen über 1000 °C und kurzzeitigen Temperaturen von 2000 °C durch Partikelauflauf zu erweichen oder abzulösen. Dies macht sie zum idealen Werkstoff für Hochtemperaturanwendungen.

2.2.1.3 Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungsverhältnis

Die Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung, bei der Eisen vollständig durch Nickel und Kupfer ersetzt wird, erzielt einen doppelten Fortschritt hinsichtlich vollständiger Entmagnetisierung und überlegener chemischer Inertheit. Sie ist die einzige zugelassene Wahl für Düsen in Medizingeräten, stark korrosiven Umgebungen, Meerwasseranwendungen und elektromagnetischen Präzisionsgeräten. Durch die Zugabe von Kupfer wird die Bindemittelphase nahezu vollständig inert gegenüber Säuren, Laugen, Salznebel, feuchter Hitze und Desinfektionsmitteln. Gleichzeitig gewährleisten die nichtmagnetischen Eigenschaften störungsfreien Betrieb, beispielsweise in MRT-, PET-CT- und Reinigungsanwendungen mit starken Magnetfeldern. In Kombination mit DLC- oder CrN- Beschichtungen rosten Wolfram-Nickel-Kupfer-Düsen selbst unter härtesten Bedingungen wie der Rostentfernung in der Schifffahrt und der pharmazeutischen Reinigung nicht, vergrößern die Bohrungen nicht und setzen keine schädlichen Ionen frei. Sie verdienen daher den Titel „König der Reinheit und Korrosionsbeständigkeit“.

2.2.1.4 Spezialformulierung: Speziell angepasst an extreme Arbeitsbedingungen wie hohe Temperatur und hoher Druck.

Wenn herkömmliche Dreikomponenten-Formulierungen den Anforderungen bestimmter extremer Betriebsbedingungen nicht mehr genügen, kommen Spezialformulierungen zum Einsatz. Diese nutzen die tiefe Mikrolegierung von Molybdän, Rhenium, Kobalt, Tantal, Seltenerdelementen oder in-situ gebildeten Carbide-/Borid-Partikeln, um einzelne Eigenschaften wie Rekristallisationstemperatur, Kavitationsbeständigkeit, Lichtbogenbeständigkeit und Oxidationsbeständigkeit bei extrem hohen Temperaturen bis an die physikalischen Grenzen bestehender Materialien zu optimieren. Sie finden häufig Anwendung in Spitzentechnologien wie dem koaxialen Pulvertransport beim Hochleistungslaserauftragschweißen, dem Plasmaspritzen bei extrem hohen Temperaturen, Düsen zur Abwasserentsorgung in Kernkraftwerken und Brennkammern für Staustrahltriebwerke. Obwohl ihre Herstellung kostspielig und zeitaufwändig ist, überwinden sie die letzte Hürde herkömmlicher Formulierungen und stellen die höchste Stufe von Wolframlegierungs-Düsenwerkstoffsystemen sowie die zukünftige Entwicklungsrichtung dar.

Dieses Komponentenverhältnissystem gleicht einem präzisen „Materialskalpell“, das die sich ständig ändernden Betriebsbedingungen der Düse in mehrere klare Bereiche unterteilt und dann das optimale Verhältnis verwendet, um den entscheidenden Punkt zu treffen. Es wandelt die Materialauswahl von Erfahrung zu Wissenschaft und die Leistung von „bestmöglich“ zu „unweigerlich optimal“ um und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

macht Düsen aus Wolframlegierung damit zur zuverlässigsten, berechenbarsten und beständigsten Kernkomponente in der High-End-Fertigungskette.

2.2 Werkstoffspezifikationen der Wolframlegierung für Düsen

Die Materialspezifikationen für in Düsen verwendete Wolframlegierungen haben das grobe Konzept von „mehreren Legierungen“ längst hinter sich gelassen und sich zu einer extrem umfangreichen, logisch stringenten, klar definierten und grammgenauen industriellen „Materialgenbibliothek“ entwickelt. Das Verhältnis jedes Gramms Wolframpulver und jedes Anteils an Nickel-Eisen-Kupfer-Vorlegierungspulver wurde Tausenden von Stunden industrieller Tests, Fehleranalysen, Lebensdauerüberprüfungen und Prozessvergleichen unterzogen und hat sich letztendlich zu einem unumstößlichen Standard entwickelt.

2.2.1 Gängige Zusammensetzungsverhältnisse und Anwendungen von Wolframlegierungen für Düsen

In der industriellen Praxis lassen sich Wolframlegierungen für Düsen in vier Hauptgruppen, Dutzende Untergruppen und Hunderte von Feinabstimmungsvarianten unterteilen. Diese bilden eine Art „Zusammensetzungskarte“, die nahezu alle bekannten Betriebsbedingungen abdeckt. Ingenieure müssen lediglich eine Tabelle mit sechs Dimensionen ausfüllen: Spitzentemperatur, Partikelhärte, pH-Wert des Mediums, Magnetfeldstärke, Anforderungen an die Wärmeleitfähigkeit und ob ein Kontakt mit dem menschlichen Körper vorgesehen ist. Das System liefert daraufhin innerhalb von Sekunden eine optimale Zusammensetzung und kann sogar den Lebensdauerverlust alternativer Lösungen präzise vorhersagen. Die Genialität dieses Systems liegt in der vollständigen Entkopplung ursprünglich widersprüchlicher Leistungsanforderungen (Härte vs. Zähigkeit, Hochtemperaturfestigkeit vs. Wärmeleitfähigkeit, Korrosionsbeständigkeit vs. nichtmagnetische Eigenschaften). Jede Gruppe ist nur für die Lösung eines zentralen Widerspruchs verantwortlich, während andere Widersprüche durch Oberflächenbearbeitung oder Konstruktionsoptimierung kompensiert werden. So wird eine globale statt einer lokalen Optimierung erreicht.

2.2.1.1 Grundrezeptur mit hohem Wolframgehalt (Wolframgehalt $\geq 90\%$)

Der hohe Wolframgehalt bildet die absolute Grundlage und die Leistungsgrenze des gesamten Systems. Die Konstruktionsphilosophie ist äußerst präzise: Der Wolframgehalt wird bis an die Grenze der Porositätsfreiheit maximiert, während gleichzeitig die Flüssigphasensinterung aufrechterhalten wird. Dadurch verbleibt lediglich ein hauchdünner Bindemittelfilm zwischen den Wolframpartikeln, wodurch ein nahezu durchgehendes Wolframgerüst entsteht. Das Ergebnis dieser Struktur ist extreme Härte und Erosionsbeständigkeit: Unter dem Rasterelektronenmikroskop können abrasive Partikel beim Auftreffen auf die Oberfläche lediglich sehr flache Kunststofffrillen erzeugen und kaum Wolframpartikel abtragen. Bei hohen Temperaturen unterliegt das Wolframgerüst selbst kaum einer Rekristallisation oder Korngrenzenwanderung, und der Düsenhalsdurchmesser sowie der Kegelwinkel bleiben über den gesamten Temperaturbereich von Raumtemperatur bis nahezu 2000 °C konstant. Die extrem hohe Dichte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Wärmekapazität gewährleisten zudem, dass die Düse unter Überschallrückstoß und plötzlichem Temperaturschock kaum Mikrovibrationen erzeugt, wodurch Strahlzittern physikalisch ausgeschlossen wird. Ein hoher Wolframanteil ist der entscheidende Vorteil für alle Prozesse, bei denen Lebensdauer und Präzision im Vordergrund stehen. Dieser Anteil wird nahezu universell in den Düsenhälsen von Überschall-Flammspritzpistolen, Kaltgasspritz-Vorbeschleunigern, Hochdruck-Wasserstrahl-Boosterdüsen und Laser-Koaxial-Pulverzuführungsdüsen eingesetzt. Er wirkt wie eine Schutzwand aus Wolframatomen, die vor extremster Erosion und thermischer Beschädigung in der Industrie schützt und einen unübertroffenen Maßstab für Härte und Dimensionsstabilität für alle nachfolgenden, feineren Formulierungen setzt.

2.2.1.2 Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungsanteile

Das Legierungsverhältnis Wolfram-Nickel-Eisen gilt in der Industrie als optimal für hohe Temperaturen und ist gleichzeitig das goldene Verhältnis mit dem größten Produktionsvolumen und dem breitesten Anwendungsbereich. Basierend auf einem wolframreichen Gerüst verwendet es eine Nickel-Eisen-Bindemittelphase, die über Jahrzehnte iterativ optimiert wurde, um ein optimales Gleichgewicht zwischen Hochtemperaturfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Oxidationsbeständigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit zu erreichen. Die Zugabe von Eisen verbessert die Beständigkeit der Binderphase gegen Erweichung und ihre Wärmeleitfähigkeit oberhalb von 800 °C signifikant. Dadurch wird die im Formhohlraum entstehende Wärme schnell und effizient zu den wassergekühlten Außenwandkanälen abgeleitet. Nickel gewährleistet die perfekte Benetzung der Wolframpartikel beim Flüssigphasensintern und verhindert so jegliche Grenzflächenporosität und schwache Bindungsstellen. Zusammen ermöglichen diese beiden Komponenten der Düse, über Tausende von Stunden hinweg Hochtemperatur- und Hochgeschwindigkeitsflammen mit Wolframoxid- und Siliciumcarbidpartikeln standzuhalten, ohne dass es zu signifikanter Porenvergrößerung, Ablösung oder thermischer Rissbildung kommt – selbst bei kontinuierlichen Hochtemperaturflammen von über 1200 °C und kurzzeitigen Höchsttemperaturen von über 2000 °C. In realen Produktionslinien für das thermische Spritzen sind Düsen mit diesem Mischungsverhältnis oft das einzige Material, das in die „permanenten Prozessparameter“ aufgenommen werden darf, da – solange keine Probleme auftreten – die Porosität, die Haftfestigkeit und die Chargenkonsistenz der gesamten Beschichtungslinie stets im optimalen Bereich bleiben. Das optimale Wolfram-Nickel-Eisen-Verhältnis stellt eine der besten Synergien zwischen Materialwissenschaft und den Anforderungen der Hochtemperaturtechnik dar.

2.2.1.3 Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungsverhältnis

Die Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung verkörpert in Perfektion Reinheit und Korrosionsbeständigkeit und löst das grundlegende Problem der Nichtmagnetisierung und Rostfreiheit in unzähligen High-End-Anwendungen auf umfassendste Weise. Durch den Kupferanteil wird die Korrosionsrate der Bindemittelphase in sauren, alkalischen, Meerwasser-, Salznebel-, Desinfektionsmittel- und feuchten Umgebungen nahezu auf null reduziert. Die Oberfläche benötigt lediglich eine einfache Passivierung, um Lochfraß, Spaltkorrosion und Spannungsrisskorrosion über die gesamte Lebensdauer zu verhindern. Gleichzeitig führt die Kombination von Kupfer und Nickel zu einer magnetischen Suszeptibilität, die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nahezu identisch mit der von Titanlegierungen ist. Dadurch wird sichergestellt, dass die Düse selbst in starken Magnetfeldern über 3 T keine Wirbelstromwärme erzeugt oder die Flugbahn abweicht. In Kombination mit DLC-, CrN- oder diamantähnlichen Kohlenstoffbeschichtungen weist die Wolfram-Nickel-Kupfer-Düse einen so niedrigen Reibungskoeffizienten auf, dass Pulver und Tröpfchen nicht haften bleiben. So bleibt die Innenwand dauerhaft glänzend und wie neu. Bei der Rostentfernung an Rotorblättern von Offshore-Windkraftanlagen gewährleistet es, dass sich die Düse auch nach Tausenden von Stunden Einwirkung von hohem Salznebel, hoher Luftfeuchtigkeit und ultrahohem Druck nicht ausdehnt; in Reinigungsanlagen für pharmazeutische und Lebensmittelanlagen erfüllt es die strengsten Anforderungen an Biokompatibilität und Sterilisation; im Bereich der MRI-kompatiblen Beschichtungsdüsen für medikamentenfreisetzende Stents ist es das einzige Material, das sowohl von der FDA als auch von der CFDA zugelassen wurde.

2.2.1.4 Spezialformulierung: Speziell angepasst an extreme Arbeitsbedingungen wie hohe Temperatur und hoher Druck.

Wenn die herkömmlichen Dreikomponentenmischungen bestimmten anspruchsvollen Betriebsbedingungen nicht vollständig gerecht werden, kommen spezielle Mischungsverhältnisse zum Einsatz. Diese Mischungsverhältnisse begnügen sich nicht mehr mit einem „ausreichenden“ Wert, sondern fordern die physikalischen Grenzen direkt heraus: Die Zugabe von Molybdän- und Rheniumsystemen erhöht die Rekristallisationstemperatur und die Hochtemperaturkriechfestigkeit auf das Niveau bestehender metallischer Werkstoffe; die Zugabe von Kobalt- und Seltenerdsystemen steigert die Korngrenzenfestigkeit und die Beständigkeit gegen Kavitation und Abplatzen um eine weitere Größenordnung; die Zugabe eines spezifischen Kupferanteils und die präzise Steuerung der Sinteratmosphäre erzeugen eine supraleitende thermische Variante, sodass die Wärmestromdichte im Düsenhals ohne Ablation nahe am theoretischen Grenzwert liegt; die In-situ-Erzeugung von Wolframcarbid-, Wolframborid- oder Nitridpartikeln steigert die Beständigkeit gegenüber diamantkomartigen Schleifmitteln auf ein extrem hohes Niveau; und selbst die Einarbeitung von Yttriumoxid und Hafniumoxid zur Bildung einer dispergierten stabilen Phase verhindert, dass die Düse selbst bei kurzzeitigen Temperaturen von nahezu 3000 Grad Celsius schmilzt oder zusammenbricht. Diese Spezialformulierungen erfordern oft Pulver in Luft- und Raumfahrtqualität, Sintern unter Vakuum und Wasserstoffatmosphäre, mehrfaches heißisostatisches Pressen, firmeneigene Nachbearbeitungsverfahren und bis zu sechs Monate industrielle Verifizierung. Die Kosten sind so hoch, dass sie normale Projektmanager abschrecken.

2.2.2 Spezifikationen und Kontrollanforderungen für in Düsen verwendete Wolframlegierungen

Die Spezifikationen für Wolframlegierungen in Düsen sind nicht mehr nur gewöhnliche Werkstoffgüten, sondern ein strenges, industrietaugliches Normensystem. Dieses umfasst die chemische Zusammensetzung, Mikrostruktur, physikalischen und mechanischen Eigenschaften, die Prozessleistung, die Reinheit, die Chargenkonsistenz und sogar die vollständige Rückverfolgbarkeit über den gesamten Lebenszyklus. Das System wurde über 20 Jahre von führenden globalen Herstellern von Anlagen für thermisches Spritzen, Wasserstrahlschneiden, Laserauftragschweißen, Common-Rail- und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Plasmaschneiden sowie von Werkstofflieferanten optimiert. Es ist in die entsprechenden Anhänge zahlreicher internationaler Normen wie ISO, ASME, AMS und DIN aufgenommen und findet sich auch in den obligatorischen Abschnitten nahezu aller Prozessdokumentationen für die Luft- und Raumfahrt, die Medizintechnik und die Kerntechnik wieder.

2.2.2.1 Spezifikationen der chemischen Zusammensetzung von Wolframlegierungsdüsen

Die Spezifikationen zur chemischen Zusammensetzung sind die „genetische Identitätskarte“ von Wolframlegierungsdüsen. Jedes Verhältnis entspricht einer Elementgrenzwerttabelle mit einer Genauigkeit von einem Zehntausendstel oder sogar einem Hunderttausendstel, die fünf Hauptkategorien abdeckt: Hauptelemente, Bindemittelphasenelemente, Mikrolegierungselemente, Restgase und schädliche Verunreinigungen. Für jeden Parameter sind strenge Ober- und Untergrenzen sowie Zielbereiche festgelegt.

Der Wolframgehalt als Hauptelement muss präzise im oberen Wolframbereich gehalten werden. Ist er zu niedrig, sind Härte und Erosionsbeständigkeit unzureichend; ist er zu hoch, kann die Sinterdichte nicht gewährleistet werden. Die Gesamtmenge der drei Hauptbestandteile der Binderphase – Nickel, Eisen und Kupfer – wird nicht nur kontrolliert, sondern auch ihr Verhältnis innerhalb eines extrem engen Prozessfensters festgelegt. Jede Abweichung führt zu einer deutlichen Verschlechterung der Benetzbarkeit, der Wärmeleitfähigkeit oder der Korrosionsbeständigkeit. Mikrolegierungselemente wie Molybdän, Rhenium, Kobalt, Tantal und Seltenerdelemente werden mit einer Präzision von wenigen Teilen pro Zehntausend zugegeben. Sie dienen dazu, die Rekristallisation zu hemmen, Korngrenzen zu stärken oder in situ Hartstellen zu erzeugen. Ist der Gehalt leicht zu hoch, bildet sich eine spröde Phase; ist er leicht zu niedrig, kommt es zum Versagen. Restgase (Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff) und schädliche Verunreinigungen werden im ppb-Bereich kontrolliert, da bereits Spuren von Sauerstoff bei hohen Temperaturen flüchtige Oxide bilden, die zu Porosität führen, und Spuren von Alkalimetallen zu Flüssigmetallversprödung führen. Die Kontrollmaßnahmen sind äußerst streng: Rohmaterialpulver müssen chargenweise einer Glimmentladungs-Massenspektrometrie und einer Infrarot-Wärmeleitfähigkeitsanalyse mittels Inertgasschmelze unterzogen werden; nach dem Sintern wird der Block erneut für eine zweite vollständige Elementanalyse beprobt; und die fertigen Düsen müssen nach der Feinbearbeitung sogar für eine dritte Überprüfung aufgeschnitten werden; alle Testdaten müssen auf eine Blockchain-basierte Rückverfolgbarkeitsplattform hochgeladen und dauerhaft mit der Chargennummer, der Ofennummer, dem Bediener und der Prüfgerätenummer verknüpft werden; wenn ein Element die Toleranz überschreitet, wird das gesamte Ofenmaterial direkt verschrottet und zur Untersuchung versiegelt.

2.2.2.2 Spezifikationen der physikalischen Eigenschaften von Wolframlegierungsdüsen

Die Spezifikationen für die physikalische Leistungsfähigkeit bilden die chemische Zusammensetzung makroskopisch ab und gewährleisten langfristig die präzise Geometrie und Strahlqualität der Düse. Sie umfassen neun Kernindikatoren: Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient, magnetische Suszeptibilität, Rekristallisationstemperatur, Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

spezifischer Widerstand und Wärmekapazität. Jeder Indikator hat einen sehr engen zulässigen Bereich und ein spezifisches Prüfverfahren und muss bei drei Temperaturen überprüft werden: Raumtemperatur, typische Betriebstemperatur und Höchsttemperatur.

Die Dichte gilt als wichtigster Indikator für die Festigkeit und muss mindestens 99,98 % der theoretischen Dichte erreichen. Poren und Einschlüsse führen unter Überschallerosion zu Spannungskonzentrationen und beginnenden Abplatzungen. Die Wärmeleitfähigkeit bestimmt direkt, ob Wärme schnell aus der Düsenmündung abgeführt werden kann. Wolfram-Nickel-Eisen-Systeme müssen auch bei hohen Temperaturen eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, während diese bei Wolfram-Nickel-Kupfer-Systemen etwas niedriger sein darf, aber absolut homogen sein muss. Der Wärmeausdehnungskoeffizient wird extrem niedrig gehalten, um sicherzustellen, dass sich Düsenmündungsdurchmesser und Kegelwinkel über den gesamten Temperaturbereich von unter Null bis 2000 °C kaum verändern. Die magnetische Suszeptibilität in Wolfram-Nickel-Kupfer-Systemen muss so gering sein, dass sie mit Messgeräten praktisch nicht messbar ist, um die Anforderung der Störungsfreiheit durch starke Magnetfelder zu erfüllen. Die Rekristallisationstemperatur ist entscheidend für die Leistungsfähigkeit von Hochtemperaturdüsen. Konventionelle Formulierungen dürfen nicht unter 1200 °C liegen, spezielle Hochtemperaturformulierungen erfordern sogar Temperaturen nahe 2000 °C. Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl bestimmen die Mikroverformung der Düse unter extrem hohem Druck und starkem Rückstoß und müssen präzise auf das Finite-Elemente-Berechnungsmodell abgestimmt sein.

Die Prüfmethoden sind gleichermaßen extrem: Die Dichte wird mittels des Archimedischen Verschiebungsprinzips und Röntgenkleinwinkelstreuung überprüft; die Wärmeleitfähigkeit wird kontinuierlich mittels Laserszintillationsmessung von Raumtemperatur bis 1500 °C geprüft; die Wärmeausdehnung wird punktuell mit einem Hochtemperatur-Laserinterferometer gemessen; die magnetische Suszeptibilität wird mit einem supraleitenden Quanteninterferometer bei Flüssigheliumtemperatur kalibriert; die Rekristallisationstemperatur wird durch eine Kombination aus Hochtemperaturmetallographie und Härtegradientenverfahren bestimmt; alle Daten müssen kontinuierliche Kurven und keine Einzelwerte bilden, und die Übereinstimmung zwischen den Kurvenreihen muss über 95 % betragen. Weicht eine physikalische Eigenschaft vom zulässigen Bereich ab, wird die gesamte Düsencharge direkt abgewertet oder vernichtet. Diese „Null-Toleranz“-Kontrolle über die physikalischen Eigenschaften erhebt Wolframlegierungsdüsen von „hochwertigen Werkstoffen“ zu „funktionalen Präzisionsbauteilen in Instrumentenqualität“ und erlaubt es den nachgelagerten Verfahrenstechnikern zum ersten Mal, Düsenlebensdauer, Strahlparameter und Beschichtungsqualität ohne zusätzliche Haftungsausschlüsse in langfristige Verträge aufzunehmen.

2.2.2.3 Spezifikationen der mechanischen Eigenschaften von Wolframlegierungsdüsen

Die Spezifikationen zur mechanischen Leistungsfähigkeit sind die ultimative Garantie dafür, dass Düsen aus Wolframlegierungen extremen kombinierten Belastungen standhalten, ohne zu brechen, zu reißen oder zusammenzufallen. Diese Spezifikationen umfassen zwölf Schlüsselindikatoren: Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung, Querschnittsverringern, Schlagzähigkeit, Dauerfestigkeit,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperatur-Schnellfestigkeit, Hochtemperatur-Kriechfestigkeit, Härte, Elastizitätsmodul, Bruchzähigkeit und Kavitations-Schälfestigkeit. Jeder Indikator muss klar definierte Bereiche bei drei Temperaturen aufweisen: Raumtemperatur, typische Betriebstemperatur und extreme Temperatur. Hochtemperaturdaten sind von größter Bedeutung, da die Düsen nicht im Labor, sondern in Flammen bei Tausenden von Grad Celsius und unter Wasserschlägen bei Hunderten von Megapascal ihren eigentlichen Belastungen ausgesetzt sind.

Zugfestigkeit und Streckgrenze entscheiden darüber, ob die Düse extrem hohem Druck und starkem Rückstoß ohne plastische Verformung standhält. Der hohe Wolframgehalt muss sowohl „extrem hohe Festigkeit“ als auch „Sprödigkeitsbeständigkeit“ gewährleisten. Dehnung und Querschnittsverringering stellen sicher, dass ein Versagen durch duktilen Bruch und nicht durch katastrophale Fragmentierung bei versehentlicher Überlastung erfolgt. Schlagzähigkeit und Bruchzähigkeit sind entscheidend für die Beständigkeit gegen Temperaturschocks und Partikelaufrall. Das Verhältnis von Wolfram-Nickel-Eisen und Wolfram-Nickel-Kupfer wird durch die Bindemittelphase optimiert, um die Sprödigkeit von reinem Wolfram vollständig in eine akzeptable Quasi-Duktilität umzuwandeln. Dauerfestigkeit und Hochtemperaturkriechfestigkeit sind entscheidend dafür, dass Überschallspritzpistolen Zehntausende von Temperaturzyklen und Wasserstrahlen Millionen von Druckpulsationen standhalten. Jede Mikrorissbildung führt zu katastrophalem Abplatzen. Die Härte wirkt direkt der abrasiven Erosion entgegen, und die Vickershärte muss den theoretischen Grenzwert des hochlegierten Wolframgerüsts erreichen. Die Kavitationsbeständigkeit ist ein spezifischer Indikator für Ultrahochdruck-Wasserstrahldüsen, der durch einen speziellen Zug-Kavitations-Verbundtest ermittelt wird und diejenige von herkömmlichem Hartmetall deutlich übertreffen muss.

Die Kontrollmaßnahmen sind beinahe rigoros: Für jede Materialcharge müssen mindestens drei Sätze von Standardproben für Zugfestigkeit, Schlagfestigkeit, Dauerfestigkeit und Bruchzähigkeit entnommen und über den gesamten Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 1500 °C geprüft werden. Proben für die Hochtemperatur-Schnellfestigkeit und Kriechfestigkeit werden hunderte von Stunden in einem Schutzgasofen gehalten. Die Härte wird mittels verschiedener Methoden, von makroskopischen Vickers-Härteprüfungen bis hin zu nanoskaligen Eindringprüfungen, ermittelt. Alle Bruchflächen werden mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) analysiert, um das Fehlen von anormalen Einschlüssen und spröden Phasen zu bestätigen. Unterschreitet eine mechanische Eigenschaft den Grenzwert, wird die gesamte Materialcharge sofort versiegelt und eine Ursachenanalyse eingeleitet. Diese kompromisslose Kontrolle der mechanischen Eigenschaften macht die Wolframlegierungsdüse von einem verschleißfesten Bauteil zu einem strukturell-funktional integrierten, tragenden Bauteil.

2.2.2.4 Spezifikationen für die Bearbeitungsgenauigkeit von Wolframlegierungsdüsen

Die Bearbeitungspräzision ist der letzte Schritt, um Wolframlegierungsdüsen von „hochwertigen Werkstoffen“ zu „präzisen Instrumenten der Fluidodynamik“ zu machen. Sie überträgt alle Vorteile der chemischen Zusammensetzung, der physikalischen und mechanischen Eigenschaften in geometrische Werte im Mikrometer- oder sogar Submikrometerbereich, wie z. B. Toleranz des Düsenhalsdurchmessers, Rundheit, Zylindrizität, konisches Profil, Innenwandrauheit, Koaxialität ,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rechtwinkligkeit und Stimflächenschärfe. Ohne diese Präzision sind selbst die besten Werkstoffe nur Schrott ; mit ihr hingegen werden Wolframlegierungsdüsen zu wahren Meistern der Bestimmung von Strahlgeschwindigkeit, Divergenzwinkel, Zerstäubungspartikelgröße, Schnittfugenbreite und Beschichtungsdichte.

Die Toleranz des Düsenhalsdurchmessers, die Rundheit und die Zylindrizität sind die Kernparameter des Systems und bestimmen direkt die Chargenkonsistenz von Durchflussrate und Geschwindigkeit. Sie müssen im Mikrometerbereich kontrolliert werden und über die gesamte Lebensdauer nahezu driftfrei bleiben. Das konische Profil bestimmt, ob die Überschallausdehnung isentrop verläuft; jede noch so kleine Stufe kann Stoßwellen auslösen und zu einer Dispersion der Partikelgeschwindigkeit führen. Die Rauheit der Innenwand muss spiegelglatt sein, und nach dem Polieren durch Strömungsbearbeitung dürfen im Rasterkraftmikroskop keine Kratzer oder Ablagerungen sichtbar sein. Koaxialität und Rechtwinkligkeit sind entscheidend für koaxiale Pulverförderdüsen und fächerförmige Düsen; selbst geringfügige Abweichungen können zu einer Schrägstellung des Pulverstrahls oder unebenen Fächeroberflächen führen. Die Schneidkante der Stirnfläche muss eine Schärfe im Nanometerbereich aufweisen, ohne aufgerollte Kanten oder Grate; andernfalls stagnieren Tropfen oder Pulver und bilden Knötchen am Auslass.

Die angewandten Methoden sind von brutaler Fertigungsästhetik geprägt: Kaltisostatisches Pressen, gefolgt von Vakuum-/Wasserstoffsintern, gewährleistet Porenfreiheit und hohe Steifigkeit des Rohlings; Tieflochbohren, mehrstufiges Diamanthonen und Ultraschall-Verbundwerkstoffbearbeitung ermöglichen die Bearbeitung tiefer Bohrungen mit einem Aspektverhältnis von mehreren Zehnerpotenzen; Fünf-Achs-Drahterodieren und Laserbearbeitung vollenden komplexe Laval-Kegeloberflächen; ein dreistufiges Verfahren aus Fließpolieren, magnetorheologischem Polieren und plasmaelektrolytischem Polieren reduziert die Rauheit der Innenwände auf Nanometerebene; jede Düse wird vor Verlassen des Werks drei vollständigen Scans mit einer Koordinatenmessmaschine, einem optischen Profilometer und einem Weißlichtinterferometer unterzogen, wobei alle Daten einen eindeutigen QR-Code generieren, der dauerhaft mit dem physischen Produkt verknüpft ist; jede Abweichung von der Präzision führt zu sofortigem Nachschmelzen. Diese hohe Bearbeitungsgenauigkeit verwandelt die Wolframlegierungsdüse von einem bloßen „Teil“ in eine „funktionale Einheit auf Standardniveau“, die es nachgelagerten Anwendern erstmals ermöglicht, „strahlkonstante Parameter“ in ihre Qualitätszusagen gegenüber Endkunden aufzunehmen. Durch diese extreme Präzision in der Bearbeitung wurde das ultimative Ziel erreicht, die Wolframlegierungsdüse zu einem „Theorie-ist-Realität, Design ist das physische Objekt“ zu machen, was ihr einen fast schon religiösen Status in der globalen High-End-Fertigungskette verleiht.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 3 Eigenschaften von Wolframlegierungsdüsen

3.1 Schmelzpunktcharakteristika von Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen bewähren sich seit Langem selbst unter extremen Bedingungen, da ihr Schmelzpunkt unter allen technischen Werkstoffen unübertroffen ist. Diese Eigenschaft ist nicht einfach nur „Hitzebeständigkeit“, sondern das Ergebnis der kombinierten Wirkung der extrem hohen metallischen Bindungsenergie der Wolframatom, des äußerst stabilen kubisch-raumzentrierten Gitters und der nahezu perfekten Dichte nach dem Flüssigphasensintern. Dadurch kann der Düsenhals kurzzeitig Plasmastrahlen mit über 3.000 °C, Überschallflammen mit über 2.000 °C und kontinuierlich heißen Verbrennungsgasen mit über 1.500 °C ausgesetzt sein, ohne zu schmelzen, abzutropfen oder sich abrupt zu erweichen. Somit bildet Wolframlegierung die absolute Grundlage für Prozesse wie thermisches Spritzen, Plasmaerzeugung, Laserauftragschweißen und Hochtemperaturverbrennung.

3.1.1 Numerischer Bereich und Bestimmungsstandards für hohe Schmelzpunkte

Wolframlegierungsdüsen basieren auf dem theoretischen Schmelzpunkt von reinem Wolfram bei 3410 °C. Durch Flüssigphasensintern und Optimierung der Bindemittelphase wird in der Praxis ein breiter und stabiler technischer Schmelzpunktbereich erreicht. Das Wolframgerüst weist einen extrem hohen Schmelzpunkt nahe dem von reinem Wolfram auf. Obwohl die Bindemittelphase einen niedrigeren Schmelzpunkt besitzt, umhüllt sie die Wolframpartikel bei hohen Temperaturen mit einem extrem dünnen Flüssigkeitsfilm. Dies verhindert die Bildung makroskopischer Kanäle mit niedrigem Schmelzpunkt und hemmt effektiv die Sublimation und Oxidationsverflüchtigung von Wolfram. Dadurch weist das Gesamtmaterial unter realen Betriebsbedingungen quasi-feuerfeste Eigenschaften ohne definierte Tropftemperatur in der flüssigen Phase auf. Selbst bei extremen Hochtemperatur-Plasmaspritzverfahren oder Ultrahochtemperatur-Flammspritzverfahren kommt es nur zu einer geringen lokalen Sublimation und Wiederablagerung von Wolframpartikeln auf der Düsenoberfläche. Das bei herkömmlichen Düsen auf Nickel- und Kobaltbasis häufig auftretende Nachtropfen von geschmolzenem Material, das Zusammenfallen der Düsenöffnung oder die Verstopfung des Durchflusskanals wird niemals vorkommen.

Der Messstandard verwendet ein international anerkanntes Drei-Methoden-Kalibrierungssystem, das Schwarzkörperofen, Hochtemperatur-Thermoelement und Zweifarben-Infrarot-Thermometrie mit Hochgeschwindigkeitsfotografie und mikroskopischen Schmelztests kombiniert, um Genauigkeit und Wiederholbarkeit über den gesamten Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 3.500 °C zu gewährleisten. Bei der praktischen Abnahme wird besonderes Augenmerk auf drei kritische Punkte gelegt: die Temperatur, bei der erste sichtbare Schmelzzeichen auftreten, die Temperatur, bei der erste Tropfen entstehen, und die Temperatur, bei der die Geometrie des Düsenhalses nicht mehr kontrollierbar ist. Diese Indikatoren sind fest in die Spezifikationen von Prozesspaketen für das thermische Spritzen in der Luft- und Raumfahrt sowie von Hochleistungsplasmaanlagen integriert und bilden die Grundlage für die Düsenauswahl und die Lebensdauerprognose.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1.2 Der Wert eines hohen Schmelzpunktes für die Anpassungsfähigkeit an Hochtemperatur-Betriebsbedingungen

Der größte Vorteil des hohen Schmelzpunktes liegt darin, dass er die Versagenskette herkömmlicher Werkstoffe unter Hochtemperaturbedingungen – „Erweichung-Verformung-Schmelzen“ – vollständig durchbricht. Erstmals wagt es die Düse, ihren Einlass direkt dem heißesten, vom Menschen kontrollierbaren Energiestrom auszusetzen, ohne dabei nachzugeben.

In den Bereichen Überschallflammspritzen und Ultrahochtemperatur-Plasmaspritzen ermöglicht der hohe Schmelzpunkt von Wolframlegierungsdüsen den kontinuierlichen Betrieb in sauerstoffhaltigen Flammen mit Temperaturen über 1800 °C und kurzzeitig über 2800 °C, ohne dass es zu Erweichung, Zusammenfallen oder Tropfenbildung an der Düsenmündung kommt. Dadurch wird sichergestellt, dass die Partikel mit maximaler Geschwindigkeit und optimaler Temperatur auf das Substrat auftreffen und so in einem einzigen Arbeitsgang eine Beschichtungsdichte und Haftfestigkeit auf Schmiedequälitätsniveau erreicht wird. Beim Hochleistungslaserauftragschweißen mit coaxialer Pulverzufuhr erlaubt der hohe Schmelzpunkt die Positionierung der Düse nur wenige Millimeter vom Rand des Laserfokus entfernt. Sie widersteht dem kombinierten Temperaturschock durch reflektiertes Laserlicht und Strahlung des Schmelzbades, ohne zu schmelzen oder zusammenzufallen, und gewährleistet so eine driftfreie Fokussierungsgenauigkeit des Pulverstrahls über Tausende von Stunden. Im Bereich der Gasturbinenbrennkammern und der Düsen von Industriekesseln ermöglicht der hohe Schmelzpunkt, dass die Düsen ihre geometrische Integrität auch bei langfristiger Spülung mit Hochtemperaturgas von über 1200 Grad Celsius beibehalten, wobei es zu keinen Chargenschwankungen im Zerstäubungskegelwinkel und der Tröpfchengröße kommt, wodurch extrem niedrige Emissionen und maximale Verbrennungseffizienz erreicht werden.

Der eigentliche Wert liegt darin, dass der hohe Schmelzpunkt der Wolframlegierungsdüse eine extrem hohe „thermische Fehlertoleranz“ verleiht: Selbst wenn die Verbrennung im Zulauf außer Kontrolle gerät und die Temperatur schlagartig um Hunderte von Grad ansteigt, verschafft die Düse dem Bediener dank ihrer enormen Wärmekapazität und ihrer Eigenschaft, nicht zu schmelzen, wertvolle Reaktionszeit und verhindert so katastrophale Anlagenschäden. Bei langfristigem Dauerbetrieb sorgt der hohe Schmelzpunkt in Verbindung mit der hohen Wärmeleitfähigkeit für einen extrem geringen Temperaturgradienten an der Düsenoberfläche und nahezu null thermische Spannungen, wodurch thermische Ermüdungsrisse vermieden werden.

3.2 Dichteigenschaften von Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen bilden die physikalische Grundlage all ihrer außergewöhnlichen Eigenschaften und stellen zugleich ihren entscheidenden Unterschied zu herkömmlichen Düsen aus Hartmetall, Keramik, Edelstahl und Titanlegierungen dar. Die hohe Dichte ist nicht einfach nur eine Ansammlung von Masse; sie ist vielmehr eine präzise gewebte „Wolframatom-Panzerung“ auf mikroskopischer Ebene, die der Düse gleichzeitig beispiellose Erosionsbeständigkeit, Strahlrichtungsstabilität,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Vibrationsfestigkeit, Wärmespeicherfähigkeit und Formstabilität unter Hochgeschwindigkeitsrückstoß verleiht. Ohne diese Dichteeneigenschaft wären alle anderen Vorteile wirkungslos.

3.2.1 Typischer Dichtebereich und Einflussfaktoren

Die Dichte von Wolframlegierungen für Düsen liegt präzise in einem extrem engen und hohen technischen Bereich: von minimal 16,8 g/cm³ (nichtmagnetisches Wolfram-Nickel-Kupfer-System) bis maximal 18,8 g/cm³ (hochfestes Wolfram-Nickel-Eisen-System oder spezielle Legierungen mit hohem Wolframanteil). Dieser Bereich deckt nahezu die maximale Dichte aller bekannten technischen Werkstoffe ab. Er ist nicht willkürlich, sondern das zwangsläufige Ergebnis des Zusammenspiels mehrerer Variablen wie Wolframgehalt, Art und Anteil der Bindemittelphase, Sinterprozessparameter und Nachbearbeitungsverfahren.

Der Wolframgehalt ist der primäre Bestimmungsfaktor; mit jedem Anstieg des Wolframgehalts um 1 % erhöht sich die Dichte linear um etwa 0,17–0,19 g/cm³. Die Art der Bindemittelphase ist der zweite Schlüsselfaktor; Nickel-Eisen-Bindemittel können im Vergleich zu Nickel-Kupfer-Bindemitteln zusätzliche 0,5–0,8 g/cm³ beitragen, da Eisen eine höhere Atommasse als Kupfer besitzt. Der Sinterprozess ist der dritte Stellhebel; Flüssigphasensintern unter Vakuum und Wasserstoffatmosphäre in Kombination mit zwei Heißisostatpressprozessen kann die Porosität auf unter 0,02 % reduzieren und die tatsächliche Dichte nahezu an den theoretischen Wert heranführen. Nachbearbeitungsverfahren wie Warmstrangpressen, Rotationsschmieden oder mehrfaches Glühen beseitigen weitere Restmikroporen und erhöhen die Dichte um einige wenige 0,01 g/cm³.

Die strengen Kontrollmaßnahmen sind erstaunlich: Jede Charge von Knüppeln muss einer doppelten Prüfung unterzogen werden – mittels Archimedes-Drainageverfahren und Kleinwinkel-Röntgenstreuung. Eine Dichteabweichung von mehr als $\pm 0,05$ g/cm³ gilt als Ausschlusskriterium. Fertige Düsen werden vor Verlassen des Werks stichprobenartig geprüft, und die Daten müssen exakt mit denen der Knüppel übereinstimmen. Sämtliche Dichtekurven, Ofennummern, Bedienerinformationen und Seriennummern der Anlagen sind lebenslang rückverfolgbar. Ist die Dichte zu gering, kann sich die Lebensdauer der Erosionsbeständigkeit halbieren, oder – noch schlimmer – Mikrovibrationen unter Überschallrückstoß können zu Strahldivergenz führen, was den Ausschuss der gesamten Charge zur Folge hat. Dieses obsessive Streben nach Dichte geht weit über bloße Leistungsindikatoren hinaus und grenzt an eine Art „Prozessvertrauen“.

3.2.2 Der Korrelationsmechanismus zwischen hoher Dichte und Verschleißfestigkeit sowie Stabilität

Der Beitrag hoher Dichte zur Verschleißfestigkeit und Stabilität bildet eine vollständige Kausalkette von der atomaren Ebene bis zum makroskopischen Verhalten, die als die gewalttätige Ästhetik der Materialwissenschaft beschrieben werden kann.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zunächst ist da die Beständigkeit gegen Erosion und Verschleiß. Hohe Dichte bedeutet eine extrem hohe Anzahl von Wolframatomten pro Volumeneinheit, was zu einem exponentiellen Anstieg des Widerstands beim Auftreffen von Abrasivpartikeln führt. Gemäß der klassischen Theorie des abrasiven Verschleißes ist die Verschleißrate umgekehrt proportional zur Materialdichte. Bei Wolframlegierungsdüsen wird dieser Zusammenhang jedoch noch verstärkt: Eine Dichte von 17–18 g/cm³ in Kombination mit einem nahezu durchgehenden Wolframgerüst bewirkt, dass fast die gesamte kinetische Energie der Abrasivpartikel in sehr geringe plastische Verformung und Wärmeenergie umgewandelt wird. Dadurch ist es praktisch unmöglich, Wolframatomte abzutrennen. Beim Überschall-Flammspritzen von Siliciumcarbidpartikeln kommt es bei herkömmlichen Hartmetalldüsen nach wenigen hundert Stunden zu einer starken Vergrößerung der Düsenöffnung, während Wolframlegierungsdüsen ihren ursprünglichen Halsdurchmesser auch nach Tausenden von Stunden beibehalten und nur einen Bruchteil der Verschleißtiefe aufweisen. Hohe Dichte bewirkt also, dass der Verschleiß praktisch vollständig vernachlässigbar ist.

Zweitens zeichnet sich die Düse durch die Stabilität von Strahlrichtung und Durchflussrate aus. Die immense Massenträgheit aufgrund der hohen Dichte gewährleistet, dass die Düse selbst bei Überschallluft oder Hochdruckwasser nahezu keine Vibrationen oder Auslenkungen im Mikrometerbereich erfährt. Düsen aus herkömmlichen Materialien würden unter der gleichen Belastung hochfrequente Schwingungen zeigen, wodurch der Strahlkernbereich vibriert und der Divergenzwinkel periodisch ansteigt. Die Massenträgheit der Wolframlegierungsdüse wirkt jedoch wie ein Fels und unterdrückt jegliche Störungen. Die Strahlrichtung bleibt über Tausende von Stunden absolut konstant, und Durchflussschwankungen liegen unterhalb der Nachweisgrenze. Bei der coaxialen Pulverzufuhr für das Laserauftragschweißen ermöglicht diese Stabilität eine Überlappung des Pulverstrahls mit dem Laserfokus im Mikrometerbereich. Das Ergebnis ist eine Oberflächenwelligkeit nach nur einem Durchgang, die mit bloßem Auge praktisch nicht wahrnehmbar ist.

Zweitens spielt die Wärmekapazität und die Absorption von Temperaturschocks eine Rolle. Hohe Dichte bedeutet extrem hohe volumetrische Wärmekapazität. Wenn die Düse einen Temperaturschock von Tausenden von Grad Celsius schlagartig aufnimmt, steigt die Temperatur nur sehr langsam an, wodurch dem Wasserkühlsystem wertvolle Zeit zur Wärmeabfuhr verschafft wird. Gleichzeitig ist der Temperaturgradient extrem gering und die thermische Spannung nahezu null, wodurch thermische Ermüdungsrisse praktisch verhindert werden. In Hochleistungs-Plasmaspritzpistolen können Düsen aus Wolframlegierung dem durch die schlagartige, unkontrollierte Verbrennung im Zulauf verursachten Temperaturanstieg standhalten, ohne zu reißen, während herkömmliche Materialien längst zu Staub zerfallen wären.

Schließlich sind da noch die hohe Steifigkeit und Verformungsbeständigkeit. Die hohe Dichte in Verbindung mit einem hohen Elastizitätsmodul gewährleistet eine vernachlässigbare Verformung der Düse selbst unter extrem hohem Druck oder starker Zentrifugalkraft. Der Düsenhalsdurchmesser und der Konuswinkel behalten ihre Ausgangswerte auch bei einem Wasserschlag von mehreren hundert Megapascal bei und beenden damit endgültig das Problem der „mit der Zeit lockerer und verformter werdenden Düsen“. Diese hohe Dichte macht die Wolframlegierungsdüse von einem bloßen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

„verschleißfesten Verschleißteil“ zu einem multifunktionalen System, das als „Antierosionsschutz, vibrationsfeste Basis, Thermoschockdämpfer und formstabiles Bauteil“ fungiert. Erstmals ermöglicht sie es der Menschheit, ihren empfindlichsten Bereich bedenkenlos extremen Energieströmen auszusetzen. Dies ist die physikalische Grundlage aller Eigenschaften der Wolframlegierungsdüse und ihrer unersetzlichen Festigkeit.

3.3 Härteeigenschaften von Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen bilden die materialtechnische Grundlage für ihre langfristige Verschleiß- und Erosionsbeständigkeit unter extremen Betriebsbedingungen. Diese Eigenschaft beruht auf der hohen intrinsischen Härte des Wolframpartikelgerüsts und dem synergistischen Effekt der Bindemittelphase. Dadurch ist die Gesamthärte der Düse deutlich höher als die von Edelstahl und Titanlegierungen, jedoch etwas niedriger als die von reinem Wolfram oder Hartmetall. So entsteht ein einzigartiges Verhältnis zwischen Verschleißfestigkeit und Zähigkeit. Dies ist entscheidend dafür, ob die Innenwand des Düsenhalses unter der Belastung durch einen Hochgeschwindigkeitsluftstrom mit harten Partikeln sauber und unverformt bleibt und somit die langfristige Zuverlässigkeit der Strahlstabilität und Prozessqualität gewährleistet wird.

3.3.1 Gängige Prüfverfahren zur Bestimmung des Härteindex

Die Härteprüfung ist die ausgereifteste und zuverlässigste zerstörungsfreie Methode zur Qualitätskontrolle von Wolframlegierungsdüsen. Sie kombiniert drei Hauptverfahren – Eindruckprüfung, Rückprallprüfung und zerstörungsfreie Ultraschallprüfung – um sicherzustellen, dass die Härteverteilung jeder Düse gleichmäßig ist und den Konstruktionsvorgaben entspricht. Die Eindruckprüfung ist die traditionellste und zugleich direkteste Methode. Typischerweise wird dabei ein Vickers- oder Rockwell-Härteprüfgerät verwendet: Unter einer festgelegten Last wird ein standardisierter Eindruck auf der Außenfläche oder einem Querschnitt der Düse erzeugt. Die Diagonale bzw. Tiefe des Eindrucks wird mikroskopisch gemessen und der Härtewert berechnet. Diese Methode eignet sich besonders für die Stichprobenprüfung und die Überprüfung des Düsenhalses und kann den synergistischen Härteeffekt zwischen dem Wolframpartikelgerüst und der Bindemittelphase direkt widerspiegeln.

Das Rückprallverfahren verwendet hauptsächlich Shore- oder Lee-Härteprüfgeräte. Ein kleiner, harter Hammer wird fallen gelassen oder auf die Düsenoberfläche geworfen, und die Rückprallhöhe bzw. -geschwindigkeit wird gemessen, um den Härtewert zu berechnen. Dieses Verfahren ist zerstörungsfrei, mobil und effizient und eignet sich für die vollständige Vor-Ort-Prüfung sowie für die Nachprüfung nach der Montage. Insbesondere bei der Beurteilung der Härte der Düseninnenwand kann die Endoskopie eingesetzt werden, um die Härteverteilung im Düsenhalsbereich indirekt zu bestimmen und so anatomische Schäden zu vermeiden.

Die zerstörungsfreie Ultraschallprüfung ist die fortschrittlichste Methode der letzten Jahre. Sie nutzt die Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung hochfrequenter Ultraschallwellen im Inneren der Düse, um den Härtegradienten zu bestimmen. Schallgeschwindigkeit und Härte korrelieren positiv, während die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dämpfung auf innere Defekte oder ungleichmäßige Härte hinweist. Durch die Abtastung mit mehreren Sonden lässt sich innerhalb weniger Minuten eine Härtekonturkarte der gesamten Düse erstellen. Dies macht die Methode besonders geeignet für die vollständige Prüfung großer oder komplex geformter Düsen. Alle Methodendaten müssen validiert werden: Die Eindruckprüfung liefert einen Referenzwert, die Rückprallprüfung ermöglicht ein schnelles Screening und die Ultraschallprüfung liefert eine flächendeckende Kartierung. So entsteht ein komplementäres, geschlossenes System, das sicherstellt, dass Härteabweichungen frühzeitig erkannt und auf die Zusammensetzung oder den Prozess zurückgeführt werden können. Dieses kombinierte Härteprüfsystem mit mehreren Methoden hat sich als entscheidender Faktor zur Unterscheidung zwischen akzeptablen und exzellenten Wolframlegierungsdüsen etabliert.

3.3.2 Korrelationsanalyse zwischen Härte und Nutzungsdauer

Der Zusammenhang zwischen Härte und Lebensdauer von Wolframlegierungsdüsen ist zwar stark positiv, aber nicht linear. Er wird vielmehr durch das Zusammenwirken vierer Mechanismen bestimmt: Die Härte beeinflusst die Erosionsrate, die Schwelle für thermische Ermüdungsrisse, die Schwelle für Kavitationsablösung und den Beginn der Oberflächenoxidation. Dies bestimmt letztendlich die Lebensdauer der Düse unter extremen Betriebsbedingungen. Höhere Härte führt zu geringeren Mikroschnitt- und Rillentiefen durch abrasive Partikel, was den Materialverlust pro Zeiteinheit verringert und die Lebensdauer bis zum Ausfall der Düsenkehle direkt verlängert. Bei thermischen Spritz- und Verbrennungsdüsen verzögert eine hohe Härte den Beginn der Hochtemperatur-Erweichung, wodurch die langfristige Stabilität der Strömungskanalgeometrie erhalten und indirekt die Verschlechterung der Prozessqualität sowie der durch Strahldivergenz verursachte beschleunigte Verschleiß unterdrückt werden. Zudem erhöht eine hohe Härte die maximale Oberflächenspannung beim Kollaps von Kavitationsblasen, wodurch die Düse weniger anfällig für Lochfraß und Rissbildung in Ultrahochdruck-Wasserstrahlen wird. Schließlich ist die Wahrscheinlichkeit der Bildung von Oxidschicht-Initiierungspunkten auf hochharten Oberflächen geringer, wodurch die Hochtemperatur-Oxidation und der Ablösungsprozess verzögert und somit die Lebensdauer der Düse in sauerstoffhaltigen Flammen deutlich verlängert wird. Das Zusammenwirken dieser vier Mechanismen wandelt die Härte von einem „statischen Indikator“ in einen „Lebensdauermultiplikator“ um und macht die Härteauslegung von Wolframlegierungsdüsen zu einem Ankerpunkt für die Lebensdauerprognose entlang der gesamten Prozesskette.

3.4 Festigkeitseigenschaften von Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen bieten gegenüber Keramik, Hartmetall und sogar reinem Wolfram ihren entscheidenden Vorteil: Sie erreichen eine Härte, die der von Keramik nahekommmt, und weisen gleichzeitig eine deutlich höhere Festigkeit und Zähigkeit auf, die der von Keramik und sogar der von hochwertigem legiertem Stahl entspricht oder diese sogar übertrifft. Dank dieser doppelten Eigenschaft – Härte und Festigkeit – kann die Düse erstmals kombinierten Belastungen durch extrem hohen Druck, starken Rückstoß, heftige Vibrationen und plötzliche Stöße standhalten, ohne zu zerbrechen oder sich dauerhaft zu verformen. Dies macht sie zur einzigen zuverlässigen Lösung für extreme

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Arbeitsbedingungen wie Hochdruckwasserstrahlen, Überschallflammspritzen, Hochleistungslaserauftragschweißen, Common-Rail-Systeme für Dieselmotoren und industrielle Reinigung.

3.4.1 Kernindikatoren für Zugfestigkeit und Druckfestigkeit

Wolframlegierungsdüsen sind zwei sich ergänzende, aber dennoch unterschiedliche Kernindikatoren, die zusammen die Sicherheitsgrenze der Düse unter komplexen Belastungsbedingungen bilden.

Die Zugfestigkeit ist das entscheidende Maß für die Bruchfestigkeit einer Düse. Eine typische hochfeste Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung erreicht bei Raumtemperatur problemlos über 1200 MPa, ja sogar fast 1500 MPa, und behält bei 800 °C über 900 MPa bei. Damit übertrifft sie die meisten martensitischen Edelstähle und Titanlegierungen deutlich. Die nichtmagnetische Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung weist zwar eine etwas geringere Zugfestigkeit auf, übersteigt aber dennoch 1000 MPa und verliert diese bei hohen Temperaturen langsamer. Diese extrem hohe Zugfestigkeit resultiert aus dem durchgehenden Netzwerk des Wolframpartikelgerüsts und der hohen Grenzflächenhaftung der Binderphase, wodurch Rissbildung und -ausbreitung erschwert werden. Selbst wenn Mikrorisse auftreten, werden diese schnell passiviert und von der duktilen Binderphase überbrückt. So wird eine seltene Kombination aus hoher Festigkeit und Quasi-Duktilität erreicht.

Die Druckfestigkeit ist fast doppelt so hoch wie die Zugfestigkeit und übersteigt oft 3000 MPa, erreicht aber sogar fast 4000 MPa, nahe dem theoretischen Grenzwert. Dadurch zeigt die Wolframlegierungsdüse unter Einwirkung von Hochdruckwasserschlag, Überschallströmung oder Zentrifugalkraft nahezu keine plastische Verformung im Düsenhals und an der Außenwand. Ihre geometrischen Abmessungen bleiben auch nach Millionen von Druckimpulsen unverändert. Die hohe Druckfestigkeit ist hauptsächlich auf den extrem hohen Kompressionsmodul und die nahezu porenfreie, dichte Struktur der Wolframpartikel zurückzuführen. Dadurch bleibt unter Druckbelastung kaum Raum für Versetzungsbewegungen, was zu einer keramikähnlichen, „harten und inkompressiblen“ Eigenschaft führt.

3.4.2 Festigkeitseigenschaften unter Hochdruckbedingungen

Unter realen Hochdruck-Betriebsbedingungen werden die Festigkeitseigenschaften von Wolframlegierungsdüsen extrem verstärkt, was eine direkte Garantie für Lebensdauer, Genauigkeit und Sicherheit darstellt.

Im Bereich des Ultrahochdruck-Wasserstrahlschneidens (280–700 MPa) entwickeln herkömmliche Hartmetalldüsen aufgrund der kombinierten Wirkung von Hochdruckwasserschlag und Kavitation häufig innerhalb weniger hundert Stunden umlaufende Risse und versagen vollständig. Wolframlegierungsdüsen hingegen, mit ihrer extrem hohen Druck- und Zugfestigkeit, weisen selbst nach Millionen von Druckimpulsen keine makroskopischen Risse im Düsenhals auf. Ihre geometrische Verformung ist so gering, dass sie im Submikrometerbereich liegt. Dadurch bleiben Schnittfugenbreite und Oberflächengüte über Tausende von Stunden konstant.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beim Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF) und Kaltspritzen müssen Düsen dem Luftstromrückschlag und starken Vibrationen von bis zu 8–10 MPa standhalten. Herkömmliche Werkstoffe brechen aufgrund schneller Ermüdungsrissausbreitung. Wolframlegierungsdüsen hingegen erhöhen die Rissinitiierungsschwelle um ein Vielfaches durch ihre extrem hohe Dauerfestigkeit und Zugfestigkeit und erreichen problemlos Standzeiten von über 3.000 Stunden pro Stück bei gleichzeitig extremer Stabilität der Partikelgeschwindigkeit und Temperaturverteilung.

Bei Common-Rail-Düsen für Dieselmotoren und koaxialen Pulverzuführungsdüsen für das Hochleistungslaserauftragschweißen gewährleisten die Festigkeitseigenschaften, dass sich die Düsen auch unter starker Rückstoß- und Zentrifugalkraft nicht lösen oder verformen und dass die Koaxialität der Düse bzw. des Pulverwegs über Zehntausende von Stunden erhalten bleibt. Dadurch wird eine langfristige Sicherung der Verbrennungseffizienz und der Formgenauigkeit erreicht.

Die extremste Auswirkung zeigt sich bei versehentlichem Überdruck oder unkontrollierter Verbrennung: Wenn der Druck im Ansaugtrakt plötzlich auf mehr als das Doppelte des Auslegungswertes ansteigt, absorbiert die Düse aus Wolframlegierung häufig Energie durch lokale plastische Verformung und versagt schließlich auf eine Weise, die sich zwar ausdehnt, aber nicht zersplittert oder spritzt. Dies verschafft dem Bediener wertvolle Zeit zur Flucht und Reparatur, während herkömmliche Materialien bereits in Fragmente zerfallen wären und eine Katastrophe verursacht hätten. Die Festigkeitseigenschaften haben die Düse aus Wolframlegierung von einem „Verbrauchsmaterial“ zu einem funktionswichtigen Bauteil gemacht, das „Lebenslasten tragen kann“. Erstmals kann die Menschheit es wagen, den empfindlichsten Teil des Ansaugkanals ohne Angst extremen Druck und Rückstoß auszusetzen.

3.5 Chemische Stabilität von Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen gewährleisten ihren langfristigen Einsatz selbst in aggressivsten chemischen Medien und oxidierenden Hochtemperaturumgebungen. Im Gegensatz zu Edelstahl, der auf einer Passivierungsschicht basiert, oder Nickelbasislegierungen, die eine Opferoxidschicht benötigen, erreicht Wolfram nahezu absolute Stabilität – „praktisch keine sichtbare Reaktion mit gängigen Medien“ – durch die extrem hohe chemische Inertheit des Wolframs selbst, die präzise Optimierung der Bindemittelphase und den Synergieeffekt der Oberflächenmikrostruktur. Dank dieser Eigenschaft können die Düsen Tausende von Stunden in extremen chemischen Umgebungen wie starken Säuren, starken Laugen, Meerwasser, Desinfektionsmitteln und sauerstoffhaltigen Hochtemperaturflammen betrieben werden, ohne dass ihre Oberfläche so sauber wie neu bleibt.

3.5.1 Verhalten bei der Beständigkeit gegen Säure- und Laugenkorrosion

Düsen aus Wolframlegierungen, insbesondere aus dem Wolfram-Nickel-Kupfer-System, weisen eine bemerkenswerte Korrosionsbeständigkeit über den gesamten pH-Bereich (0–14) auf und gelten daher als Inbegriff von Korrosionsbeständigkeit. In konzentrierter Schwefelsäure, konzentrierter Salpetersäure, Salzsäure, Königswasser, Fluorwasserstoffsäure, heißer konzentrierter Lauge, siedendem

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Natriumhypochlorit, Meerwasser, Salznebel, feuchten und heißen Umgebungen sowie den meisten organischen Säuren ist der Oberflächenqualitätsverlust der Düsen so gering, dass er praktisch nicht messbar ist, und Lochfraß, Spaltkorrosion, interkristalline Korrosion und Spannungsrisskorrosion werden vollständig verhindert.

Der Kernmechanismus liegt darin, dass Wolfram selbst bei Raumtemperatur gegenüber den meisten nichtoxidierenden Säuren völlig inert ist; die Zugabe von Kupfer bewirkt, dass die Bindemittelphase eine extrem stabile Kupfer-Nickel-Mischkristallphase bildet, die sich in starken Säuren nicht auflöst und in starken Laugen keiner Hydroxidionenkorrosion unterliegt; die dichte Struktur mit nahezu null Porosität nach dem Sintern verhindert vollständig das Eindringen korrosiver Medien entlang von Korngrenzen oder Poren; obwohl die extrem dünne Passivierungsschicht, die sich natürlicherweise auf der Oberfläche bildet, löslich ist, kann sie sich während des Korrosionsprozesses extrem langsam selbst reparieren, wodurch sich ein dynamisches Gleichgewicht anstelle eines kontinuierlichen Abblätterns bildet.

In realen industriellen Szenarien zeigen Wolfram-Nickel-Kupfer-Düsen weder Lochfraß noch Dimensionsänderungen während tausender Stunden Hochdruck-Meerwasser-Rostentfernungsarbeiten an Offshore-Windkraftanlagenflügeln; sie bleiben rostfrei und setzen keine schädlichen Ionen frei, wenn sie in chemischen Rohrleitungsbeiz- und Alkaliwaschanlagen direkt kochenden konzentrierten Säuren und Laugen ausgesetzt werden; sie erfüllen die strengsten Anforderungen an Reinheit und wiederverwendbare Sterilisation bei der Hochdruckdesinfektion und -reinigung von Lebensmittel- und pharmazeutischen Anlagen; und ihre Oberflächen bleiben auch nach langfristigem Eintauchen in saure Lösungen, die radioaktive Elemente enthalten, in Abwasserbehandlungsprozessen von Kernkraftwerken dauerhaft inaktiv.

3.5.2 Antioxidative Kapazität unter Hochtemperaturbedingungen

Die Leistung von Wolframlegierungsdüsen in sauerstoffhaltigen Hochtemperaturumgebungen ist ebenso beeindruckend, da sie den bekannten Nachteil von reinem Wolfram, bei hohen Temperaturen leicht flüchtig und oxidierbar zu sein, vollständig überwinden. Werden Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen und solche mit hohem Wolframanteil in sauerstoffhaltigen Flammenströmen oder Plasma-Lichtbögen bei Dauertemperaturen über 1200 °C oder kurzzeitigen Temperaturen über 2000 °C eingesetzt, bildet sich – im Gegensatz zum lockeren, flüchtigen Oxid „Wolframblau“ von herkömmlichem reinem Wolfram – lediglich eine extrem dünne und dichte WO₃-Schutzschicht auf der Oberfläche. Die Gewichtszunahme und das Dickenwachstum durch Oxidation sind so gering, dass sie praktisch vernachlässigbar sind, und die Geometrie der Düse bleibt über Tausende von Stunden aufgrund von Oxidation und Abplatzungen unverändert.

Der Mechanismus ist folgender: Die Binderphase (insbesondere Nickel-Eisen) unterliegt bei hohen Temperaturen bevorzugt einer Spurenoxidation, wodurch eine extrem dünne Nickel-Wolfram-Komposit-Spinellschicht entsteht, die die Wolframpartikel fest einschließt und die weitere Diffusion von Sauerstoffatomen in das Innere verhindert; die Wolframpartikel selbst sublimieren direkt unter der Beschichtung der Binderphase nur schwer, und eine Oxidation kann nur in Form einer extrem langsamen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Grenzflächenreaktion erfolgen; die nahezu porenfreie Struktur verhindert das Eindringen von Sauerstoff entlang der Korngrenzen; obwohl die auf der Oberfläche gebildete WO_3 -Schicht flüchtig ist, haftet sie aufgrund der „Pinning“-Wirkung der Binderphase fest, und der Teufelskreis aus „Blasenbildung, Abblättern und beschleunigter Oxidation“, der bei herkömmlichem reinem Wolfram auftritt, findet nicht statt.

In extremen Hochtemperatur- und sauerstoffreichen Umgebungen wie dem Hochgeschwindigkeits-Sauerstoffspritzen (HVOF), dem atmosphärischen Plasmaspritzen (APS), dem Hochleistungsplasmaschweißen und -schneiden sowie Gasturbinenbrennkammern zeigen Wolframlegierungsdüsen eine erstaunliche Leistungsfähigkeit: Sie sind hitzebeständig, sauerstoffunempfindlich und abriebfest. Die Lebensdauer einer einzelnen Düse übersteigt problemlos mehrere tausend Stunden, während herkömmliche kupferbeschichtete oder Hartmetalldüsen aufgrund von Oxidation und Korrosion oft schon nach wenigen hundert Stunden ausfallen. Dank dieser Oxidationsbeständigkeit können Wolframlegierungsdüsen ihre Düsenöffnungen direkt dem heißesten, sauerstoffreichsten Energiestrom aussetzen, der vom Menschen kontrolliert werden kann, ohne dass dies zu Problemen führt. Dadurch werden die Temperaturgrenzen von Prozessen wie dem thermischen Spritzen, der Plasmaerzeugung und der Hochtemperaturverbrennung um Hunderte von Grad Celsius erweitert. Die extreme chemische Stabilität, insbesondere die hervorragende Beständigkeit gegen Säure- und Laugenkorrosion sowie gegen Oxidation bei hohen Temperaturen, erhebt Wolframlegierungsdüsen von einem bloßen "Material" zu einem "dauerhaften Hals, der in der Lage ist, jeder chemischen Erosion während seiner gesamten Lebensdauer zu widerstehen".

3.6 Wärmeleitfähigkeit von Wolframlegierungsdüsen

Die Wärmeleitfähigkeit ist die entscheidende Eigenschaft, die es Wolframlegierungsdüsen ermöglicht, auch unter extremen Hitzebelastungen ruhig und effizient zu arbeiten. Sie verhindert, dass der Düsenhals durch lokale Überhitzung bei Flammen oder Laserreflexionen von Tausenden von Grad Celsius weich wird, oxidiert oder sich verformt. Stattdessen wirkt er wie eine hocheffiziente Wärmeleitung, die die zerstörerische Hitze schnell an die wassergekühlte Außenwand oder die Umgebung abführt. Dadurch wird die Düse von einem „Opfer hoher Temperaturen“ zu einem „Meister der hohen Temperaturen“. Genau deshalb können Wolframlegierungsdüsen auch unter extremen Hitzebedingungen wie thermischem Spritzen, Plasmaerzeugung, Laserauftragschweißen und Hochleistungsverbrennung dauerhaft eingesetzt werden, ohne durchzubrennen.

3.6.1 Wichtige Parameterbereiche der Wärmeleitfähigkeit

Wolframlegierungsdüsen bilden je nach Zusammensetzung ein deutliches Gradientenspektrum: Die hochfeste Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung weist aufgrund des Eisenanteils eine höhere Wärmeleitfähigkeit auf; die nichtmagnetische und korrosionsbeständige Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung besitzt aufgrund der inhärenten Wärmeleitfähigkeitsvorteile von Kupfer einen weiter verbesserten Koeffizienten; die Basislegierung mit hohem Wolframgehalt erzielt ein Gleichgewicht zwischen beiden; und die spezielle supraleitende Legierung kann die Wärmeleitfähigkeit durch

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Erhöhung des Kupfergehalts und präzise Steuerung der Sinteratmosphäre und des anschließenden Warmstrangpressprozesses bis an die theoretische Obergrenze bestehender Wolframlegierungen steigern.

Dieser Bereich resultiert aus dem präzisen Zusammenspiel mehrerer Faktoren: Die Wärmeleitfähigkeit von Wolfram beruht primär auf dem Elektronentransfer, und reines Wolfram weist bereits einen der höchsten Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten aller Metalle auf. Die Nickel-Eisen- oder Nickel-Kupfer-Bindemittelphasen füllen die Zwischenräume zwischen den Wolframpartikeln in extrem dünnen Schichten, ohne dabei einen signifikanten Wärmewiderstand zu erzeugen oder die Elektronenbeweglichkeit durch Legierungsbildung zu beeinträchtigen. Die nahezu porenfreie, dichte Struktur eliminiert Wärmestreueung an Poren vollständig. Die gezielte Zugabe von Mikrolegierungselementen wie Kobalt und Seltenerdelementen optimiert den Wärmewiderstand an den Korngrenzen zusätzlich, was zu einer minimalen Wärmeleitfähigkeitsabnahme bei hohen Temperaturen führt. Die eigentlichen Tests umfassen kontinuierliche Laserszintillationsmessungen von Raumtemperatur bis 1500 °C, die durch eine Vergleichsmethode im stationären Zustand validiert werden, um eine hohe Übereinstimmung der Wärmeleitfähigkeitskurven für jede Charge sicherzustellen. Durch diese präzise Abstufung und extreme Kontrolle der Wärmeleitfähigkeit können die Anwender das geeignete Verhältnis je nach Wärmelastintensität genau auswählen: Wolfram-Nickel-Eisen für mäßig hohe Temperaturen, eine Wolframbasis für mäßig hohe Temperaturen und Wolfram-Nickel-Kupfer oder spezielle supraleitende Varianten für extrem hohe Temperaturen. So wird sichergestellt, dass keine Verschwendung oder Mangelercheinungen entstehen.

3.6.2 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf die Temperaturverteilung und die thermische Verformung

Eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit unter realen Arbeitsbedingungen kann als ein stiller, aber lebenswichtiger Kampf im großen Maßstab um Temperaturverteilung und thermische Verformung beschrieben werden.

Zunächst wird das Temperaturfeld der Düse grundlegend verändert. Beim Überschall-Flammspritzen oder Hochleistungs-Plasmaspritzen wird die Düsenhalsfläche schlagartig einem Wärmestrom von Tausenden von Grad ausgesetzt. Reicht die Wärmeleitfähigkeit nicht aus, kann die lokale Temperatur innerhalb von Millisekunden bis zum Erweichungs- oder sogar Schmelzpunkt ansteigen, was zum Kollaps des Düsenhalses oder zu Oxidation und Abplatzungen führen kann. Die hohe Wärmeleitfähigkeit der Wolframlegierungsdüse ermöglicht jedoch eine extrem schnelle radiale und axiale Wärmediffusion, wodurch die höchste Temperatur im Düsenhals unterhalb eines sicheren Schwellenwerts bleibt. Die Außenwandtemperatur liegt nur wenige zehn Grad über der des Kühlwassers, wodurch eine ideale Temperaturverteilung mit „innerer Wärme und äußerer Kälte und einem extrem steilen Gradienten“ entsteht. Diese Verteilung verhindert nicht nur Materialermüdung, sondern minimiert auch thermische Spannungen, da die Wärmeausdehnung hauptsächlich in der extrem dünnen Oberflächenschicht stattfindet und die tieferen Schichten kaum Temperaturänderungen erfahren.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zweitens wird thermische Verformung nahezu vollständig eliminiert. Düsen aus herkömmlichen Werkstoffen erfahren unter hohen Temperaturgradienten aufgrund der unterschiedlichen inneren und äußeren Ausdehnung erhebliche thermische Spannungen, was zu einem vergrößerten Düsenhalsdurchmesser, einer Abweichung des Kegelwinkels oder sogar zu einer Gesamtverbiegung führen kann. Im Gegensatz dazu unterdrücken Düsen aus Wolframlegierung mit ihrem gleichmäßigen Temperaturfeld, das durch die hohe Wärmeleitfähigkeit und den extrem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten erzeugt wird, thermische Verformungen effektiv bis in den Submikrometerbereich. Selbst nach Tausenden von Stunden Hochtemperaturerosion bleibt die Düsenhalsgeometrie exakt mit den Messungen im kalten Zustand konsistent. Bei coaxialen Pulverzuführungsdüsen für das Laserauftragschweißen gewährleistet diese „thermisch formstabile“ Eigenschaft über Tausende von Stunden eine Drift von null zwischen dem Fokuspunkt des Pulverstrahls und dem Fokuspunkt des Lasers und ermöglicht so eine Formgenauigkeit in einem einzigen Arbeitsgang, die mit Schmiedeteilen vergleichbar ist.

Schließlich bietet die Wärmeleitfähigkeit auch einen lebensrettenden Schutz vor plötzlichen Temperaturschocks. Wenn die Verbrennung im Zulauf außer Kontrolle gerät oder die Laserreflexion sprunghaft ansteigt, ermöglicht die hohe Wärmeleitfähigkeit die sofortige Wärmeabfuhr, was zu einem extrem flachen Temperaturanstieg im Düsenhals führt. Dies verschafft dem Wasserkühlsystem und den Bedienern wertvolle Reaktionszeit und verhindert ein katastrophales Durchbrennen. Die Wärmeleitfähigkeit ist somit nicht länger nur ein einfacher physikalischer Parameter, sondern die ultimative strategische Waffe für Wolframlegierungsdüsen, um auf dem Hochtemperatur-Schlachtfeld „Hitze in Sicherheit und Gefahr in Schutz zu verwandeln“. Sie verleiht der Düse erstmals die bemerkenswerte Fähigkeit, „je intensiver die Verbrennung ist, ruhig zu bleiben“, sodass man bedenkenlos die heißeste Energie direkt in den empfindlichsten Düsenhals leiten kann.

3.7 Elektrische Leitfähigkeit von Wolframlegierungsdüsen

Die Leitfähigkeit ist eine der flexibelsten und am besten steuerbaren Eigenschaften von Wolframlegierungsdüsen in einem Materialsystem. Ähnlich wie bei einem Stimmwirbel, der eine Saite zupft, lässt sie sich von einem hochleitfähigen Zustand, der dem von reinem Kupfer nahekommmt, bis zu einem isolierenden Zustand, vergleichbar mit Keramik, einstellen. Dank dieser anpassbaren Leitfähigkeit können Wolframlegierungsdüsen präzise auf Prozessanforderungen in extremen elektromagnetischen Umgebungen wie starken elektrischen Feldern, hohen Strömen, Plasmaentladungen, elektromagnetischer Induktionserwärmung und starken Magnetfeldern abgestimmt werden, ohne dabei als parasitäre Anknüpfungspunkte für Entladungen zu fungieren, Wirbelstromwärme zu erzeugen oder präzise elektromagnetische Messungen zu stören.

3.7.1 Numerische Kenngrößen der elektrischen Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit (charakterisiert durch den spezifischen Widerstand oder die elektrische Leitfähigkeit) von Wolframlegierungsdüsen bildet ein vollständiges Spektrum von hoher Leitfähigkeit bis hin zu nahezu isolierender Leitfähigkeit: Der spezifische Widerstand von Wolfram-Kupfer-Legierungen mit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

speziellem Mischungsverhältnis und hohem Kupferanteil ist am niedrigsten und nähert sich fast dem Wert von reinem Kupfer an; die nichtmagnetische und korrosionsbeständige Legierung Wolfram-Nickel-Kupfer weist einen etwas höheren Wert auf, behält aber dennoch eine ausgezeichnete Leitfähigkeit bei; die herkömmliche Legierung Wolfram-Nickel-Eisen liegt im mittleren Bereich und zeigt einen Übergangsbereich von schwacher zu mittlerer Leitfähigkeit; die Standardlegierung mit hohem Wolframgehalt und einige spezielle Legierungen können den spezifischen Widerstand durch Reduzierung des Anteils der Bindemittelphase oder durch Zugabe von Spuren Mengen einer isolierenden Phase auf das Niveau von Hartmetall oder sogar Zirkonoxidkeramik senken.

Die Ausbildung dieses Spektrums beruht ausschließlich auf der präzisen Kontrolle von Art und Menge der Bindemittelphase: Kupfer, als bester elektronischer Leiter, weist mit steigendem Anteil und gleichmäßigerer Verteilung eine höhere Leitfähigkeit auf; die Leitfähigkeit von Eisen und Nickel nimmt sukzessive ab, und die Elektronenstreuung verstärkt sich bei hohen Temperaturen; wird die Gesamtmenge der Bindemittelphase auf ein Minimum reduziert und bilden Wolframpartikel ein nahezu durchgehendes Gerüst, werden die Elektronenmigrationskanäle stark blockiert, was zu einem sprunghaften Anstieg des spezifischen Widerstands führt. Während der Herstellung ermöglicht eine Kombination aus Pulverpartikelgrößenanpassung, Feinabstimmung der Sintertemperaturkurve sowie Nachbehandlungs- und Wärmebehandlungsprozessen eine präzise Einstellung des spezifischen Widerstands um mehrere Größenordnungen innerhalb derselben Rezeptur. Die Prüfung erfolgt mittels Vierpunktmessung in Kombination mit einem Hochtemperatur-Vakuum-Widerstandsmessgerät, wodurch hochreproduzierbare Widerstandskurven über den gesamten Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 1000 °C gewährleistet werden.

3.7.2 Anpassungsfähigkeit der Leitfähigkeit an spezifische Anwendungsszenarien

Die anpassbare Leitfähigkeit beweist eine bemerkenswerte Anpassungsfähigkeit in realen Szenarien und ist damit der entscheidende Schlüssel zur Lösung einer Reihe elektromagnetischer Probleme, die mit herkömmlichen Materialien nicht zu bewältigen sind.

In den Bereichen Lichtbogenplasmaspritzen, Plasmaschweißen und -schneiden können hochleitfähige Wolfram-Kupfer- oder Wolfram-Nickel-Kupfer-Düsen als Elektrodenverlängerungen dienen und direkt zur Lichtbogenführung beitragen. Sie werden vom Lichtbogen nicht erodiert und können die Joulesche Wärme schnell abführen, wodurch Überhitzung und ein Zusammenfallen der Düsenöffnung verhindert werden. Bei ultrafeinen Plasmaanwendungen, die eine strenge Lichtbogenkontrolle erfordern, wird eine Düse mit hohem spezifischem Widerstand und hohem Wolframanteil gewählt, wodurch die Düse zu einem natürlichen Lichtbogenisolator wird. Der Lichtbogen wird präzise in der vorgesehenen Position fixiert, und die Schnittfugenbreite sowie die Beschichtungsgleichmäßigkeit erreichen ein bisher unerreichtes Niveau.

In Düsen zur Medikamentenbeschichtung, MRI-kompatiblen Stent-Sprühdüsen und Düsen zur Reinigung mittels starker magnetischer Trennung in Umgebungen mit starken Magnetfeldern eliminieren die vollständig nichtmagnetischen und mäßig leitfähigen Eigenschaften von Wolfram-Nickel-Kupfer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wirbelstromwärme und Hystereseverluste. Dadurch wird sichergestellt, dass die Düsentemperatur in Magnetfeldern über 3 T kaum ansteigt und die Strahlbahn überhaupt nicht von der Lorentzkraft beeinflusst wird. Dies gewährleistet eine gleichmäßige Ablagerungsdicke der Medikamentenpartikel im Nanometerbereich und erfüllt die strengsten Anforderungen an Reinheit und Sicherheit im medizinischen Bereich.

Bei der C- axialen Pulverzuführungsdüse für induktionserwärmungsunterstütztes Laserauftragschweißen und selektives Laserschmelzen ermöglicht das mittlere Leitfähigkeitsverhältnis von Wolfram, Nickel und Eisen, dass die Düse durch das mittelfrequente Induktionsfeld leicht vorgewärmt wird, um den Thermoschock zu reduzieren, ohne übermäßige Wirbelströme zu erzeugen, die zu einer Überhitzung führen würden. Dadurch wird sichergestellt, dass der Pulverstrahl im Hochtemperaturbereich perfekt fokussiert bleibt. Bei Hochspannungs-Elektrostatikzerstäubung, elektrostatischem Sprühen und elektrostatischer Staubentfernung macht das hohe Widerstandsverhältnis die Düse zu einem idealen Träger für Koronaentladungselektroden. Das elektrische Feld ist an der Spitze konzentriert und breitet sich nicht entlang des Düsenkörpers aus, wodurch die Zerstäubungspartikelgröße und die Haftung der Beschichtung maximal optimiert werden.

Durch präzise Anpassung der Leitfähigkeit können Düsen aus Wolframlegierungen erstmals auf elektromagnetische Umgebungen reagieren: Sie sind bei Bedarf leitfähiger als Kupfer, isolierender als Keramik, unempfindlich gegenüber schwachen Magnetfeldern und leiten Joulesche Wärme bei Bedarf sofort ab. Sie sind somit nicht länger nur mechanische Bauteile, sondern eine Art „intelligente elektromagnetische Haut“, die aktiv elektromagnetische Felder steuert und uns erstmals völlige Gestaltungsfreiheit für den Rachenraum in Umgebungen mit starker Elektrizität, starkem Magnetismus und starken Magnetfeldern ermöglicht. Diese Leitfähigkeitseigenschaft beseitigt endgültig den alten Irrglauben, dass hohe Temperaturbeständigkeit die elektromagnetische Verträglichkeit und umgekehrt die Lebensdauer beeinträchtigt.

3.8 Verschleißfestigkeit von Wolframlegierungsdüsen

Die wichtigste, intuitivste und industriell bewährteste Eigenschaft von Wolframlegierungsdüsen ist ihre Verschleißfestigkeit. Sie bestimmt, ob die Düse auch unter extremen erosiven Bedingungen, wie z. B. bei Hochgeschwindigkeitsluftströmen mit harten Partikeln, Hochdruckwasserstrahlen mit abrasiven Partikeln und wiederholtem Aufprall von geschmolzenem Pulver, eine gleichmäßige Düsenhalsgeometrie und Innenwand beibehält. Dadurch wird die kontinuierliche Zuverlässigkeit von Strahlgenauigkeit, Strömungsstabilität und Prozessqualität gewährleistet. Die Verschleißfestigkeit von Wolframlegierungsdüsen übertrifft die von herkömmlichen Hartmetall-, Keramik-, Edelstahl- und Reinstwolframdüsen.

3.8.1 Verschleißmechanismus und Kriterien zur Bewertung der Verschleißfestigkeit

Wolframlegierungsdüsen sind im praktischen Einsatz hauptsächlich vier Verschleißmechanismen ausgesetzt: abrasiver Erosionsverschleiß, Kavitationsabplatzverschleiß, synergistischer Verschleiß durch

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperaturerweichung und kombinierter Adhäsionsermüdungsverschleiß. Abrasive Erosion ist der häufigste Ausfallmechanismus. Hierbei treffen harte Partikel wiederholt in steilen oder flachen Winkeln auf die Düseninnenwand und den Düsenhals, was zu Mikrorissen, Riefenbildung oder Abplatzungen führt. Kavitationsabplatzverschleiß tritt bei Hochdruckwasserstrahldüsen auf. Der Kollaps von Kavitationsblasen erzeugt kurzzeitige Hochdruck-Stoßwellen, die zu Oberflächenermüdungsabplatzungen führen. Synergistischer Verschleiß durch Hochtemperaturerweichung ist typisch für das thermische Spritzen und Plasmaspritzen. Hierbei nimmt die Härte des Düsenhalses bei hohen Temperaturen leicht ab, wodurch sich Partikel leichter einbetten und abschneiden lassen. Kombiniertes Adhäsionsermüdungsverschleiß tritt bei Laserauftragschweißdüsen auf. Hier haftet geschmolzenes oder halbschmelzflüssiges Pulver kurzzeitig an und wird dann vom Luftstrom abgerissen, was zu wiederholter Zugspannungsermüdung an der Oberfläche führt.

Der Standard zur Bewertung der Verschleißfestigkeit bildet ein vollständig geschlossenes industrielles Prüfsystem: In der Laborphase kommen der verbesserte ASTM G76-Gas-Feststoff-Erosionstest, der ASTM G134-Kavitationstest, der Hochtemperatur-Härte-Erosions-Verbundtest und ein kundenspezifischer Pulverhaftungs-Reiß-Zyklustest zum Einsatz. In der industriellen Prüfphase dienen die Zunahme des Düsenhalsdurchmessers, die Verschlechterungsrate der Innenwandrauheit, die Zunahme des Strahldivergenzwinkels und die Strömungsdrift als entscheidende Kriterien. Abschließend wird durch die Kombination von metallografischer Analyse, rasterelektronenmikroskopischer Bruchuntersuchung und dreidimensionaler Konturabtastung ein vollständiger Zusammenhang zwischen mikroskopischem Versagensmechanismus und makroskopischer Lebensdauer hergestellt. Nur Düsen, die sowohl die extremen beschleunigten Labortests als auch die Langzeit-Industrietests bestehen, gelten als verschleißfest auf dem Niveau von Wolframlegierungen.

3.8.2 Methoden zur Material- und Strukturoptimierung zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit

Wolframlegierungsdüsen haben sich zu einem systematischen Ingenieurprojekt entwickelt, das Werkstoffe, Mikrostruktur, Oberfläche und Struktur integriert.

Auf Materialebene werden durch kontinuierliche Erhöhung des Wolframgehalts, Optimierung des Bindemittelphasenverhältnisses, Zugabe von Kobalt oder Seltenerdelementen zur Verstärkung der Korngrenzen und In-situ-Erzeugung ultraharter Carbide- oder Boridpartikel die intrinsische Härte, die Dauerfestigkeit und die Beständigkeit gegen Hochtemperaturerweichung der Matrix maximal ausgereizt. Auf mikroskopischer Ebene wird durch Kontrolle der Wolframpartikelgrößenverteilung, Erzielung eines nahezu durchgehenden Wolframgerüsts und Beseitigung schwacher Bindungsstellen und Mikroporen erreicht, dass die Abrasivpartikel beim Aufprall nur eine sehr geringe plastische Verformung der äußersten Schicht hervorrufen und somit das Abtrennen intakter Wolframpartikel verhindern.

Auf der Oberflächenebene kommen Techniken wie das Borieren zur Bildung einer mehrere Mikrometer dicken, gehärteten Wolframboridschicht und die PVD/CVD-Abscheidung von TiAlN zum Einsatz. CrN-, DLC- oder Mehrschicht-Verbundbeschichtungen, Laserschmelzen zur Verdichtung und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Plasmaelektropolieren werden eingesetzt, um die Oberflächenhärte weiter zu erhöhen und den Reibungskoeffizienten zu reduzieren. Gleichzeitig werden die Adhäsionstendenz und die Wahrscheinlichkeit der Ermüdungsrissbildung deutlich verringert. Auf struktureller Ebene wird durch die Optimierung des Laval-Kegelwinkels und der Länge des Expansionsabschnitts zur Reduzierung der Partikelaufrallwinkel, die Gestaltung von Mikrotexturen an der Innenwand zur Lenkung des Partikelgleitens anstelle frontaler Kollisionen sowie die Anordnung eines Stabilisierungsabschnitts vor dem engsten Querschnitt zur Abschwächung der Turbulenzintensität die tatsächliche Erosionsintensität signifikant reduziert.

Diese Methoden werden nicht isoliert, sondern je nach Verschleißmechanismus kombiniert: Thermische Spritzdüsen nutzen hochfeste Werkstoffe in Kombination mit Borierung und Laserschmelzen; Wasserstrahldüsen verwenden hochfeste Legierungen und eine DLC-Beschichtung; und Pulverspritzdüsen nutzen spiegelglatte Innenwände, reibungsarme Beschichtungen und Mikrotexturierung. Diese synergistische Optimierung entlang der gesamten Wertschöpfungskette, von der atomaren Ebene bis zur makroskopischen Geometrie, hat die Verschleißfestigkeit von Wolframlegierungsdüsen von „weit über der von herkömmlichen Werkstoffen“ zu dem industriellen Wunder „nahezu verschleißfrei“ sprunghaft ansteigen lassen.

3.9 Schlagfestigkeit von Wolframlegierungsdüsen

Die Schlagfestigkeit ist der grundlegendste Vorteil von Wolframlegierungsdüsen gegenüber Keramik, Hartmetall und reinem Wolfram. Sie ermöglicht es der Düse, extremen dynamischen Belastungen wie plötzlichen Hochgeschwindigkeitseinschlägen durch harte Partikel, Hochdruckwasserschlägen, starken Temperaturschocks und versehentlichen Überdruckexplosionen ohne Spröbruch oder irreversible plastische Verformung standzuhalten. Dadurch ist Wolframlegierung das einzige Düsenmaterial, das unter extremsten und unvorhersehbaren Betriebsbedingungen über lange Zeiträume beständig ist.

3.9.1 Prüfverfahren und Indikatoren für die Schlagfestigkeit

Wolframlegierungsdüsen bilden ein komplettes System, das beschleunigte Laborsimulationen mit industriellen Extremverifizierungen kombiniert.

In der Laborphase werden hauptsächlich drei Kernmethoden angewendet:

- Hochgeschwindigkeits-Partikelerosions-Schlagtest: Standard-Schleifmittel wie Aluminiumoxid, Siliciumcarbid und Granat werden mit Druckluft oder Helium auf die Düsenmündung und die Innenwand aufgebracht und treffen diese wiederholt in einem einstellbaren Winkel und mit einstellbarer Geschwindigkeit. Die Anzahl der kritischen Schläge und die Energie, bei der erste sichtbare Mikrorisse oder Absplitterungen auftreten, werden erfasst.
- Dynamischer Aufpralltest mit Ultrahochdruck-Wasserhammer: Durch eine spezielle Impulswasserpistole wird eine sofortige Hochdruck-Stoßwelle erzeugt, um den Kollaps von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kavitationsblasen und Druckänderungen zu simulieren und die Schwelle für Oberflächenermüdungsabplatzungen und allgemeine Rissbildung zu ermitteln.

- Eine Flamme erhitzt das Material innerhalb weniger Sekunden von Raumtemperatur auf über 1500 Grad Celsius und kühlt es anschließend rasch mit Wasser ab. Dieser Zyklus wird hunderte Male wiederholt, um die durch den Thermoschock verursachte Ausbreitung von Mikrorissen und die Neigung zu Makrobrüchen zu beurteilen.

In der Phase der industriellen Verifizierung wird die Leistung im realen Einsatz als ultimativer Indikator herangezogen: Bleibt die Düse nach Tausenden von Stunden, in denen sie von einem Überschallluftstrom mit harten Partikeln bestrahlt wird, intakt? Bleibt die Wasserstrahldüse nach versehentlichem Überdruck oder häufigem Ein- und Ausschalten intakt? Und kann die thermische Sprühdüse nach einem extremen Temperaturschock durch unkontrollierte Verbrennung weiterhin verwendet werden?

3.9.2 Die Bedeutung der Stoßfestigkeit für die Anpassungsfähigkeit an komplexe Arbeitsbedingungen

Die Bedeutung der Stoßfestigkeit unter realen und komplexen Arbeitsbedingungen geht weit über das Wort „langlebig“ hinaus. Sie bestimmt unmittelbar, ob eine Düse langfristig in einem industriellen Umfeld voller Unsicherheiten bestehen kann.

Beim Überschall-Flammspritzen und Kalspritzen wird die Düse jede Sekunde von zehntausenden harten Partikeln frontal oder tangential getroffen. Keramikdüsen zerbrechen oft innerhalb von Minuten in spröde Fragmente, während Hartmetalldüsen nach Hunderten von Betriebsstunden Ermüdungsrisse entwickeln. Wolframlegierungsdüsen hingegen, mit ihrer überlegenen Schlagfestigkeit und Dauerfestigkeit, bleiben selbst nach Tausenden von Betriebsstunden so sauber wie neu, wobei Partikelgeschwindigkeit und Temperaturverteilung stets im optimalen Bereich liegen.

Im Bereich des Ultrahochdruck-Wasserstrahlens ist die lokale Stoßspannung, die durch häufiges Starten und Stoppen, Druckänderungen und das plötzliche Zusammenfallen von Kavitationsblasen entsteht, extrem hoch. Düsen aus herkömmlichen Werkstoffen neigen zu Umfangsrissen und vollständigem Bruch. Düsen aus Wolframlegierung hingegen, die sich durch ihre Bruch- und Stoßfestigkeit auszeichnen, ermöglichen es dem Anwender, selbst unter härtesten Bedingungen in der Schifffahrt oder bei der nuklearen Dekontamination tausende Stunden lang ununterbrochen zu arbeiten, ohne einen plötzlichen Düsenausfall befürchten zu müssen.

Beim Laserauftragschweißen mit koaxialer Pulverzufuhr und Hochleistungsplasmaspritzen treten häufig unerwartete Ereignisse wie unkontrollierte Verbrennung, Laserreflexionen und Pulveragglomerationsexplosionen auf. Wolframlegierungsdüsen absorbieren oft die gesamte Energie durch lokal begrenzte, geringfügige plastische Verformung und versagen schließlich auf sichere Weise, indem sie sich ausdehnen, aber nicht brechen und kein Pulver verspritzen. Dadurch wird wertvolle Zeit für die Reparatur von Anlagen und Personal gewonnen, während andere Materialien bereits in gefährliche Splitter zerfallen sind.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der bedeutendste Aspekt liegt in der Schlagfestigkeit, die es Düsen aus Wolframlegierungen erstmals ermöglicht, „Unvorhersehbarkeit“ in ihre Konstruktionstoleranzen zu integrieren. Sie erfordern nicht länger permanente Perfektion von den vorgelagerten Anlagen, sondern absorbieren proaktiv selbst heftigste, unerwartete Stöße und bilden so die letzte Sicherheitslinie und Lebensdauergarantie für die gesamte Prozesskette. Diese Schlagfestigkeit erhebt Düsen aus Wolframlegierungen von „Präzisionsverbrauchsmaterialien“ zu einem „industriellen Rückgrat, das für die Sicherheit von Menschenleben unerlässlich ist“.

3.10 Dimensionsstabilität von Wolframlegierungsdüsen

Dimensionsstabilität ist die grundlegende Voraussetzung dafür, dass Düsen aus Wolframlegierungen konstant die gewünschte Strahlqualität liefern. Sie gewährleistet, dass Düsenhalsdurchmesser, Konuswinkel und Expansionsprofil über extreme Temperaturbereiche von Raumtemperatur bis zu Tausenden von Grad Celsius und von Atmosphärendruck bis zu Hunderten von Megapascal nahezu unverändert bleiben und somit den ultimativen geometrischen Maßstab für alle Präzisionsstrahlverfahren darstellen.

3.10.1 Gesetze der Dimensionsverformung bei Temperaturänderungen

Die Wolframlegierungsdüse zeigt bei schnellen Temperaturänderungen nahezu perfekte Linearität und eine extrem geringe Steigung. Dank des extrem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Wolfram, der synergistischen Wirkung der Binderphase und des starren Gerüsts mit nahezu porenfreier Struktur ist die axiale und radiale Wärmeausdehnung der Düse beim Erhitzen von Raumtemperatur auf über 1500 °C extrem gering und sehr gleichmäßig, nahezu ohne irreversible Verformung. Bei schnellen Temperaturänderungen erzeugt der kurzzeitige Temperaturschock lediglich einen sehr geringen Temperaturgradienten in der äußersten Schicht, während das Innere seine ursprünglichen Abmessungen beibehält. Nach längerem Halten bei hoher Temperatur und anschließender Abkühlung auf Raumtemperatur entspricht die Geometrie des Düsenhalses exakt den Messungen im kalten Zustand, ohne Hysterese oder bleibende Verformung.

3.10.2 Einfluss der Dimensionsstabilität auf die Spritzgussgenauigkeit

Die Dimensionsstabilität fixiert direkt alle Kernparameter des Strahls: Durchflussrate, Geschwindigkeit, Divergenzwinkel, Richtwirkung und Chargenkonsistenz. Beim thermischen Spritzen gewährleisten der konstante Düsenhalsdurchmesser und der konstante Kegelwinkel, dass Partikelgeschwindigkeit und Temperaturverteilung über Tausende von Stunden unverändert bleiben und somit höchste Beschichtungsdichte und Haftfestigkeit erreicht werden. Beim Ultradruck-Wasserstrahlschneiden sorgt die konstante Düsenhalsgröße für eine perfekte Konsistenz der Schnittfugenbreite und Oberflächenrauheit vom ersten bis zum letzten Schnitt. Bei der coaxialen Pulverzufuhr für das Laserauftragschweißen ermöglicht die optimale Geometrie des Pulver- und Gaswegs die mikrometergenaue Übereinstimmung des Pulverstrahlfokus mit dem Laserfokuspunkt. Dadurch wird eine Formgenauigkeit in einem einzigen Durchgang erzielt, die mit Schmiedeteilen vergleichbar ist. Die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dimensionsstabilität wandelt die „Strahlgenauigkeit“ von einem Ziel, das möglichst genau kontrolliert werden muss, in ein unvermeidliches Ergebnis um. Verfahrenstechniker können so erstmals die Düsenlebensdauer direkt mit der Endproduktqualität verknüpfen, ohne zusätzliche Toleranzen einzuführen.

3.11 Strahlungsbeständigkeit von Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen übertreffen herkömmliche Edelstahl-, Titanlegierungen und Nickelbasis-Hochtemperaturlegierungen in Umgebungen mit hoher Neutronen-, Gamma-, Alpha- und Beta-Strahlung und sind damit das einzige Düsenhalsmaterial, das in den anspruchsvollsten Bereichen der Nuklearindustrie über lange Zeit eingesetzt werden kann.

3.11.1 Kernindikatoren für die Bewertung der Strahlungsbeständigkeit

Die Bewertung der Strahlungsbeständigkeit konzentriert sich auf drei Kernindikatoren: die Bestrahlungsschwellungsrate, die Bestrahlungsversprödungstendenz und die Erhaltung der mechanischen Eigenschaften. Wolframlegierungen weisen aufgrund ihrer hohen Ordnungszahl, ihres dichten Kristallgitters und ihres moderaten Neutroneneinfangquerschnitts nach Bestrahlung extrem niedrige Schwellungsraten auf, da Leerstellen und Zwischengitteratome leicht rekombinieren. Die optimierte Binderphase zeigt nahezu keine Phasenübergänge mit Fernordnung, wodurch die Bestrahlungsversprödung minimiert wird. Hochtemperaturbestrahlung führt zu minimalen Abnahmen der Härte, Zugfestigkeit und Schlagzähigkeit; bei einigen Legierungen tritt sogar eine Bestrahlungshärtung auf. Zu den Bewertungsmethoden gehören die Langzeitbelastung im Reaktor, metallografische und mechanische Nachmessungen nach Hochenergiebestrahlung sowie die Analyse der Heliumversprödungstendenz mittels thermischer Desorptionsspektroskopie.

3.11.2 Anpassungsfähigkeit an strahlungsintensive Umgebungen wie die Nuklearindustrie

In den anspruchsvollsten Strahlungsumgebungen der Nuklearindustrie haben sich Düsen aus Wolframlegierungen als unverzichtbarer Standard etabliert. Bei Anwendungen wie der Reinigung von Reaktorhauptpumpen, der Hochdruckreinigung zur Behandlung radioaktiver Abfälle, der Brennelementdekontamination, der Kühlung von Isotopenproduktionszielen und der Präzisionszerstäubung in Heißkammern müssen Düsen gleichzeitig der kombinierten Belastung durch starke Neutronenstrahlung, Gammastrahlung und hochtemperierte, hochdruckbeaufschlagte radioaktive Medien standhalten. Herkömmliche Werkstoffe versagen oft innerhalb weniger Monate aufgrund von Strahlungsschwellung und -rissbildung, Versprödung oder Korrosionsdurchdringung. Düsen aus Wolframlegierungen hingegen, die nahezu keine Schwellung aufweisen, extrem verspröden und über eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit verfügen, bleiben über mehrere Jahre im Reaktor oder in der Heißkammer geometrisch intakt und strahlstabil. Dies gewährleistet eine effiziente Dekontamination und minimiert das Volumen radioaktiver Abfälle. In den intensiven Strahlungsumgebungen von Beschleuniger-Zielkammern, Synchrotronstrahlungsquellen und Isotopenproduktions-Heißkammern widerstehen Wolframlegierungsdüsen, die als Kühldüsen, Strahlführungsdüsen und Vakuumdichtungs-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Übergangskomponenten dienen, der langfristigen Bestrahlung durch hochdosierte Gammastrahlen und geladene Teilchen ohne signifikante Aktivierung oder Dimensionsänderung. Dies gewährleistet Strahlqualität und Anlagenverfügbarkeit. Dank dieser Strahlungsbeständigkeit können Wolframlegierungsdüsen erstmals im empfindlichsten Bereich der Kerntechnik eingesetzt werden und bilden die einzige Verbindung zwischen den extremen Anforderungen von „intensiver Strahlung“ und „präziser Strahlführung“.

3.12 Oberflächeneigenschaften von Wolframlegierungsdüsen

Die Oberflächeneigenschaften bilden die erste Schnittstelle, über die Wolframlegierungsdüsen in direkten Kontakt mit Hochgeschwindigkeitsmedien, Partikeln und Tröpfchen treten. Sie bestimmen den Strömungswiderstand, die Partikeladhäsion, die Kavitationsschwelle, den Strahldivergenzwinkel und die Lebensdauer und stellen somit den letzten Schritt bei der Umsetzung der intrinsischen Vorteile des Materials in die tatsächliche Prozessleistung dar.

3.12.1 Eigenschaften der Oberflächenrauheit und des Reibungskoeffizienten

Nach präzisem Polieren erreicht die Innenwand der Wolframlegierungsdüse eine spiegelglatte Oberfläche mit nahezu keinen mikroskopischen Erhebungen, an denen Partikel oder Tröpfchen haften bleiben könnten. Dadurch ergeben sich extrem niedrige dynamische und statische Reibungskoeffizienten. Der Düsenhals und der Expansionsbereich sind wie mit einer natürlichen, supergleitfähigen Beschichtung versehen, sodass Gas-Feststoff- oder Gas-Flüssigkeits-Zweiphasenströmungen an der Wand entlanggleiten, anstatt zu rollen. Dies reduziert Grenzschichtturbulenzen, Strömungswiderstand und Geräuschentwicklung deutlich. Gleichzeitig bewirkt der extrem niedrige Reibungskoeffizient, dass harte Partikel eher tangential an der Wand entlanggleiten, anstatt sich vertikal einzubetten. Dadurch wird der Verschleiß durch Mikroschneiden und Pflügen erheblich verringert. Diese „für das Licht unsichtbare, aber gleitfähige“ Oberflächeneigenschaft macht die Wolframlegierungsdüse unter gleichen Betriebsbedingungen sauberer, leiser und verschleißfester als Düsen mit Innenwänden aus herkömmlichen Materialien.

3.12.2 Die Rolle der Oberflächenbehandlung bei der Verbesserung der Eigenschaften

Oberflächenbehandlungen verbessern die Oberflächeneigenschaften von Wolframlegierungsdüsen von „exzellent“ auf „extrem“. Durch Borieren entsteht eine extrem harte Wolframboridschicht, die die Oberflächenhärte auf nahezu Diamantniveau erhöht. Die PVD/CVD-Abscheidung von TiAlN-, CrN-, DLC- oder mehrlagigen Nanokompositbeschichtungen reduziert den Reibungskoeffizienten weiter in den Bereich der Superschmierung und bietet gleichzeitig mehrfachen Schutz vor Anhaften, Oxidation und Korrosion. Laserschmelzen und Plasmaelektropolieren erhalten die Zähigkeit des Substrats, verdichten die Oberfläche und beseitigen mikroskopische Defekte. Mikrotextrurierung erzeugt geordnete Mikroporen oder Mikrorillen auf einer spiegelglatten Oberfläche, die aktiv das Gleiten der Partikel lenken und die Turbulenzintensität verringern. Diese Behandlungen werden nicht einfach übereinandergelegt, sondern je nach Betriebsbedingungen kombiniert: intensives Borieren +

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Laserschmelzen für thermische Spritzdüsen, intensive DLC-Beschichtung für Wasserstrahldüsen und intensive reibungsarme Beschichtung + Mikrotexturierung für Pulverförderdüsen. Durch Oberflächenbehandlungen wird die Innenwand von Wolframlegierungsdüsen von „natürlich glatt“ zu „künstlich perfekt“ verändert, wodurch die Lebensdauer und die Strahlqualität um eine weitere Größenordnung gesteigert werden.

3.13 Dauerfestigkeit von Wolframlegierungsdüsen

Die Dauerfestigkeit ist die grundlegende Garantie dafür, dass Düsen aus Wolframlegierungen auch nach Zehntausenden von Temperaturzyklen, Millionen von Druckimpulsen und Hunderten von Millionen von Partikeleinschlägen unbeschädigt bleiben. Sie ermöglicht es erstmals, Materialermüdung als Hauptursache für Düsenausfälle vollständig zu eliminieren.

3.13.1 Prüfmethoden und Einflussfaktoren für die Ermüdungslebensdauer

Für die Dauerfestigkeitsprüfung wurde ein zweistufiges Prüfverfahren etabliert, das beschleunigte Labortests und industrielle Langzeitzyklentests kombiniert. Das Labor nutzt eine pneumatische Impulsermüdungsmaschine zur Simulation von Hochdruck - Start- und -Abschaltvorgängen, eine Thermoschock-Ermüdungsmaschine zur Durchführung von Heiß- und Kaltzyklen zweiter Ordnung, eine Ultraschall-Ermüdungsmaschine zur Beurteilung der Partikelschlagermüdung bei extrem hohen Frequenzen sowie eine servohydraulische Presse zur Durchführung von Zug-Druck-Torsions-Ermüdungstests an Verbundwerkstoffen. Einflussfaktoren werden systematisch in Materialfaktoren (Wolframpartikelgröße und -verteilung, Zähigkeit der Bindemittelphase, Grenzflächenhaftung), Oberflächenfaktoren und Strukturfaktoren unterteilt.

3.13.2 Ermüdungsbeständigkeit unter wechselnden Lastbedingungen

Unter realen, wechselnden Belastungsbedingungen weisen Düsen aus Wolframlegierungen eine nahezu unübertroffene Dauerfestigkeit auf. Unter den Millionen von Druckimpulsen, die durch die häufigen Start-Stopp-Zyklen von Ultrahochdruck-Wasserstrahlen entstehen, hätten herkömmliche Werkstoffe bereits Ermüdungsrisse erlitten, während der Düsenhals der Wolframlegierung intakt blieb. Bei Tausenden von Zünd-Stopp-Zyklen täglich von Thermospritzpistolen entwickelten andere Werkstoffe netzartige thermische Ermüdungsrisse, die Oberfläche der Wolframlegierungsdüse blieb jedoch glatt. In koaxialen Pulverzuführungsdüsen beim Laserauftragschweißen, die während des Dauerbetriebs explosiven Stößen durch Pulveragglomeration ausgesetzt waren, zeigten herkömmliche Düsen Abplatzungen, während die Innenwand der Wolframlegierungsdüse nach Tausenden von Betriebsstunden wie neu aussah.

3.14 Sicherheitsdatenblatt für Wolframlegierungsdüsen der CTIA GROUP LTD

Das Sicherheitsdatenblatt (SDB) für Wolframlegierungsdüsen der CTIA GROUP LTD ist ein standardisiertes Dokument zur Chemikaliensicherheit, das vom Unternehmen für seine Düsenprodukte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

auf Wolframbasis mit hoher Dichte entwickelt wurde. Es dient der umfassenden und zuverlässigen Risikoidentifizierung und bietet Schutzmaßnahmen über den gesamten Lebenszyklus hinweg – von der Rohstoffbeschaffung über Produktion und Verarbeitung, die Installation der Anlagen bis hin zu Anwendung, Wartung und Entsorgung. Als weltweit führender Anbieter von Wolframwerkstoffen erfüllt das SDB der CTIA GROUP LTD die Anforderungen des Global Harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS) der Vereinten Nationen sowie die chinesische Norm GB/T 16483. Es umfasst Kernmodule wie Stoffidentifizierung, physikalische und chemische Eigenschaften, Stabilität und Reaktivität, toxikologische Informationen, ökotoxikologische Wirkungen, Entsorgung, Transportinformationen sowie Hinweise zu Vorschriften und Haftung. So wird sichergestellt, dass Anwender in industriellen Sprüh-, Reinigungs-, Schneid- und Zerstäubungsprozessen unfall- und umweltschonende Betriebsabläufe gewährleisten.

Das Materialidentifizierungsmodul klärt zunächst die chemische Zusammensetzung der Wolframlegierungsdüse: hauptsächlich Wolfram (CAS 7440-33-7), ergänzt mit Nickel (CAS 7440-02-0), Eisen (CAS 7439-89-6) oder Kupfer (CAS 7440-50-8), wodurch ein hochdichter metallischer Verbundwerkstoff mit typischem silbergrauem metallischem Glanz entsteht.

Im Modul über die physikalischen und chemischen Eigenschaften wird die Wolframlegierungsdüse als ein hochschmelzender, hochtemperaturbeständiger metallischer Verbundwerkstoff mit extrem niedriger Löslichkeit beschrieben, der in Wasser unlöslich, aber in Königswasser oder heißer konzentrierter Schwefelsäure löslich ist.

Der Abschnitt zur Stabilität gibt an, dass die Düse bei Raumtemperatur sehr stabil ist. Bei höheren Temperaturen kann es jedoch zu Oberflächenoxidation kommen. Daher wird empfohlen, sie an einem trockenen, gut belüfteten Ort zu lagern und direkten Kontakt mit starken Säuren und Laugen zu vermeiden. Die Transportinformationen stufen die Wolframlegierungsdüse als nicht gefährliches Gut ein und erlauben ihren Transport als gewöhnliches Metallprodukt. Die Angaben zu den gesetzlichen Bestimmungen enthalten die REACH- und RoHS- Konformitätserklärungen sowie die Einhaltung der chinesischen Normenreihe GB 30000.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsdüsen

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/cm³), 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

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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

Kapitel 4 Herstellung von Wolframlegierungsdüsen

4.1 Rohmaterialaufbereitungsprozess für Wolframlegierungsdüsen: vom Wolframerz zum Legierungspulver

Wolframlegierungsdüsen beginnen mit der Reinheit und mikroskopischen Perfektion des Pulvers. Führende Unternehmen haben die gesamte Rohstoffkette vertikal integriert und erreichen so eine lückenlose Kontrolle vom Erzabbau bis zum fertigen Verbundpulver. Jede noch so kleine Abweichung in einem Prozess verstärkt sich in den darauffolgenden Tausenden von Betriebsstunden unter extremen Bedingungen enorm.

4.1.1 Vorbehandlung von Wolframerz: Aufbereitungs- und Reinigungsverfahren

Die Wolfram-Erzvorbehandlung nutzt Wolframit und Scheelit als Rohstoffe und wandelt das ursprünglich minderwertige Erz durch Schwerkrafttrennung, Flotation, Magnetscheidung und mehrstufige kombinierte Verfahren in ein hochreines Konzentrat um. Hauptziel ist die gründliche Entfernung schädlicher Verunreinigungen wie Phosphor, Arsen, Molybdän, Zinn und Silicium. Chemische Reinigungsverfahren wie alkalisches Sieden bei hohen Temperaturen und hohem Druck, selektive Zersetzung mit Salzsäure oder mehrstufige Lösungsmittelextraktion werden eingesetzt, um den Verunreinigungsgehalt auf Spuren zu reduzieren. So entsteht ein hochreiner Wolfram-Vorläufer, der direkt zur Herstellung von Wolframpulver in Düsenqualität verwendet werden kann und die Grundlage für die nachfolgende Reduktion und Legierung bildet.

4.1.2 Herstellung von Wolframpulver: Reduktionsprozess und Partikelgrößenkontrolle

Die Herstellung von Wolframpulver erfolgt mittels eines klassischen, mehrstufigen Wasserstoffreduktionsverfahrens unter Verwendung von hochreinem Ammoniumparatungstat oder Wolframoxid als Ausgangsmaterialien. Durch präzise Steuerung der Reduktionstemperaturzonen, der Wasserstoffströmung, der Schiffsgeschwindigkeit und der Ofenatmosphäre wird eine vollständige Umwandlung von grobem Oxid zu ultrafeinem Wolframpulver erreicht. Die Kontrolle der Partikelgröße ist entscheidend: Durch eine Kombination aus primärer Reduktion bei mittlerer Temperatur und langer Zykluszeit sowie Feinreduktion bei niedriger Temperatur, Luftstromklassierung und Ultraschallsiebung erhält das Wolframpulver eine nahezu ideale sphärische Morphologie, eine extrem enge Partikelgrößenverteilung und eine saubere, agglomerierte Oberfläche. Dies liefert optimale Ausgangspartikel für die nachfolgende Legierungsbildung und das Formpressen mit hoher Dichte.

4.1.3 Legierungsbehandlung: Wichtige Punkte der Dotierungs- und Mischprozesse

Die Legierung ist der entscheidende Schritt für die endgültige Leistung der Düse. Nickel-, Eisen-, Kupfer- oder deren vorlegierte Pulver werden präzise im Zielverhältnis abgewogen und anschließend zusammen mit Wolframpulver in eine Hochenergie-Kugelmühle oder ein dreidimensionales Hocheffizienz-Mischsystem gegeben. Ein kombinierter Prozess aus Nassmischen, Vakuumtrocknen und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sekundärer Reduktion unter Schutzgasatmosphäre gewährleistet, dass die Bindemittelphase die Wolframpartikel gleichmäßig auf atomarer Ebene umhüllt und gleichzeitig Oxidation und Kohlenstoffverunreinigungen verhindert werden. In dieser Phase werden spezielle Anteile zugeführt, um Mikrolegierungselemente wie Molybdän, Rhenium, Kobalt und Seltenerdelemente einzubringen. Durch ultralangzyklisches Mischen bei niedriger Drehzahl und mehrfaches Umdrehen wird eine vollständig homogene Mischkristall- oder Dispersionsverteilung erreicht, die die Grundlage für die Ausbildung eines perfekten Mikrogefüges beim anschließenden Sintern bildet.

4.1.4 Pulverleistungskontrolle: Optimierung der Fließfähigkeit und Schüttdichte

Die Fließfähigkeit und Schüttdichte des Pulvers bestimmen maßgeblich die Dichtehomogenität und die endgültige Sinterdichte des Grünlings. Durch verschiedene Verfahren wie Sprühgranulation, Oberflächenmikrobeschichtung, Partikelsphäroidisierung, Vakuumentgasung und Niedertemperaturglühen erzielt das Unternehmen ein hochsphärisches Kompositpulver ohne Satellitenkügelchen und innere Hohlräume. Dadurch werden die Hall-Fließgeschwindigkeit und die Schüttdichte im optimalen Bereich gehalten, sodass Abweichungen zwischen den Chargen praktisch nicht mehr messbar sind. Dank dieser Pulvereigenschaft, „wie eine Flüssigkeit zu fließen und wie ein Feststoff zu füllen“, lassen sich durch anschließendes Kaltisostatisches Pressen und Präzisionsformen Grünlinge mit einem Dichtegradienten von null und ohne innere Defekte problemlos herstellen.

4.2 Umformprozess von Wolframlegierungsdüsen: Rohlingumformtechnologie und Auswahl

Die Vorformung ist der erste finale Fertigungsschritt bei Wolframlegierungsdüsen und entscheidet darüber, ob das nachfolgende Sintern und die Endbearbeitung die theoretische Dichte und Fehlerfreiheit erreichen können. Führende Unternehmen haben eine umfassende Technologiematrix entwickelt, die auf traditionellen Verfahren wie Spritzgießen, isostatischem Pressen und additiver Fertigung basiert. Sie haben eine klare Prozessauswahllogik etabliert, die Düsengröße, Strukturkomplexität, Aspektverhältnis, Losgröße und Kostentoleranz berücksichtigt, um sicherzustellen, dass jede Düse den geeignetsten und wirtschaftlichsten Formgebungsprozess durchläuft.

4.2.1 Traditionelles Formpressen: Formpressprozess und Parametersteuerung

Das traditionelle Spritzgießen wird hauptsächlich für kleine bis mittelgroße, relativ einfache Düsen mit gerader Bohrung und kurze Laval-Düsen eingesetzt. Es verwendet hochpräzise Hartmetallformen und austauschbare Dorne und ermöglicht unidirektionales oder bidirektionales Spritzgießen auf hydraulischen oder Servopressen. Die Hauptvorteile liegen in der präzisen Steuerung des Pressdruckgradienten, der gezielten Auswahl von Trennmitteln, der Gewährleistung einer gleichmäßigen Pulverfüllung und der Optimierung der Parameter während des gesamten Press-, Halte- und Entformungszyklus. Dies führt nach dem Entformen zu einem Vorformling ohne Delamination, Endrisse und Dichtelücken. Die Spritzgießtechnologie ist ausgereift, die Formkosten sind niedrig und die Zykluszeit kurz, was sie zur bevorzugten wirtschaftlichen Lösung für die Produktion von Hunderttausenden konventionellen Düsen pro Jahr macht.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2.2 Präzisionsumformtechnik: Vorteile des isostatischen Pressverfahrens

Isostatisches Pressen (vorwiegend Kaltisostatisches Pressen (CIP) und sekundär Heißisostatisches Pressen (HIP)) hat sich als dominierende Formgebungstechnologie für hochwertige Wolframlegierungsdüsen etabliert. Beim Kaltisostatischen Pressen dient eine Flüssigkeit als Druckübertragungsmedium. Dadurch wird ein gleichmäßiger, omnidirektionaler Druck von 360° erreicht, das Längen-Durchmesser-Verhältnis übersteigt problemlos das Vierzigfache. Dichtegradienten und innere Spannungen, die beim Formgebungsprozess auftreten, werden vollständig eliminiert. Heißisostatisches Pressen hingegen führt Sintern und Verdichten gleichzeitig in einer inerten Hochtemperatur-Hochdruck-Atmosphäre durch. So entsteht direkt ein Vorformling mit nahezu theoretischer Dichte, der kaum nachbearbeitet werden muss, um Sinterverformungen zu beseitigen. Das isostatische Pressverfahren gewährleistet, dass der Düsenvorformling von Anfang an perfekte Eigenschaften wie „Null Porosität, Null Spannungen und Null geometrische Abweichungen“ aufweist. Daher ist es die einzige zuverlässige Methode zur Herstellung von ultralangen Laval-Düsen, Düsen mit komplexen internen Strömungskanälen und Hochleistungsdüsen.

4.2.3 Additive Fertigungstechnologie: Erkundung von 3D-Druckanwendungen

Selektives Laserschmelzen (SLM), selektives Elektronenstrahlschmelzen (EBM) und Binder Jetting (mit Entbindern und Sintern) überwinden rasant die geometrischen Grenzen von Wolframlegierungsdüsen. SLM ermöglicht die Fertigung von integralen Düsen mit spiralförmigen Kühlkanälen, variablen Querschnittserweiterungen, integrierten Strömungsstabilisierungsgittern und sogar Mehrfachdüsenanordnungen in einem einzigen Prozess. Dadurch werden die physikalischen Beschränkungen der traditionellen Dornenextraktion und der Tieflochbearbeitung vollständig beseitigt. Binder Jetting hingegen ermöglicht die endkonturnahe Formgebung großer, komplexer Düsen zu geringeren Kosten. Die additive Fertigung hat sich bereits in der Serienproduktion von personalisierten Düsen in Kleinserien, Prototypen zur schnellen Funktionsprüfung und hochkomplexen Kühldüsen für die Luft- und Raumfahrt etabliert und wird voraussichtlich zukünftig die traditionellen Verfahren bei funktionsgraduierten Düsen und integrierten Spritzpistolen vollständig ersetzen.

4.2.4 Auswahl des Formgebungsverfahrens: basierend auf Düsenspezifikationen und Chargenanforderungen

In der industriellen Praxis hat sich ein klarer Auswahlentscheidungsbaum etabliert:

- Massenproduktion, konventionelle Düsen mit geradem Loch oder kurze Laval-Düsen → Traditionelles Formen + Bearbeiten
- Großvolumige, ultralange oder hochpräzise Laval-Düsen → Kaltisostatisches Pressen + geringfügige Nachbearbeitung
- Klein- bis Mittelserienfertigung, komplexe interne Strömungskanäle oder integrierte Kühlstrukturen → Kaltisostatisches Pressen + Heißisostatisches Pressen Netzformung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Kleinstserien, extrem komplexe Geometrien oder schnelles iteratives Prototyping → SLM oder Binder Jetting
- Extrem hohe Dichte + komplexe Geometrieforderungen → Heißisostatisches Pressen oder SLM + Nachbearbeitung durch heißisostatisches Pressen

Diese matrixbasierte Auswahllogik maximiert die wirtschaftlichen und technologischen Vorteile jedes Prozesses und gewährleistet gleichzeitig, dass der Düsenrohling unabhängig von Losgröße oder struktureller Komplexität über den optimalen Weg die theoretische Dichte und den geometrischen Sollwert erreicht. Dadurch wird ein neues Fertigungsparadigma realisiert: „Keine Qualitätseinbußen in der Massenproduktion und keine Preiserhöhungen bei personalisierter Anpassung“.

4.3 Sinterprozess von Wolframlegierungsdüsen: Kerntechnologie zur Verdichtung

Das Sintern ist der entscheidende Schritt bei der Umwandlung von Wolframlegierungsdüsen aus Rohlingen in funktionale Körper mit nahezu theoretischer Dichte. Es ist zugleich der technisch anspruchsvollste und potenziell kritischste Prozessschritt in der gesamten Fertigungskette. Bleiben Poren zurück, ist das Mikrogefüge uneben oder treten Risse und Verformungen auf, brechen die Erosionsbeständigkeit und die Dimensionsstabilität der gesamten Düse vollständig zusammen. Führende Unternehmen haben den Sinterprozess zu einer perfekten Verbindung von Kunst und Wissenschaft entwickelt und gewährleisten durch Vorbrennen, Hochtemperaturesintern, präzise Steuerung der Verdichtungsmechanismen und fehlerfreies Management, dass Dichte, Mikrogefüge und Leistung jeder Düse nach dem Sintern die theoretischen Grenzen erreichen.

4.3.1 Vorbehandlung vor dem Brennen: Entfettungs- und Spannungsabbauprozess

Das Vorbrennen ist der unsichtbare Garant für erfolgreiches Sintern. Es gewährleistet die vollständige Entfernung von Granulierungsmitteln und Formhilfsmitteln, den vollständigen Abbau von Press- und Eigenspannungen im Gemisch sowie die initiale Anbindung der Wolframpartikel. Der Prozess wird in einem kontinuierlichen oder segmentierten Wasserstoffofen mit einer extrem langsamen, mehrstufigen Heizkurve durchgeführt. Zunächst werden organische Bestandteile in der Niedertemperaturzone pyrolysiert und verdampft. Anschließend entfernt die Wasserstoffreduktion in der Mitteltemperaturzone die Oberflächenoxidschicht. Schließlich werden bei höherer Temperatur eine vorläufige Halsverbindung und Spannungsrelaxation erreicht. Der gesamte Prozess erfordert eine präzise Steuerung des Wasserstofftaupunkts, der Ofenströmungsgleichmäßigkeit und der Beladungsmethode des Formschießens, um jeglichen Restkohlenstoff, lokales Überbrennen oder Spannungskonzentrationen zu vermeiden.

4.3.2 Hochtemperaturesintern: Wichtige Parameter für die Temperatur- und Atmosphärensteuerung

Das Hochtemperaturesintern ist der Kernprozess zur Verdichtung von Wolframlegierungsdüsen. Typischerweise wird hierfür ein vertikaler oder horizontaler Sinterofen mit einer Vakuum-Wasserstoff-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Doppelatmosphäre eingesetzt. Der Prozess wird primär durch die vollständige Verflüssigung der Bindemittelphase, die Umlagerung der Wolframpartikel und die Auflösungs- und Wiederausfällungsprozesse angetrieben. Präzise Heiz-, Halte- und Kühlkurven gewährleisten, dass die flüssige Phase das Wolframgerüst vollständig benetzt und alle Poren füllt. Die Temperaturregelung erfolgt mittels unabhängiger Mehrzonenheizung und geschlossener Infrarot-Thermografie, um minimale Temperaturunterschiede an jedem Punkt im Ofen sicherzustellen. Die Atmosphärenregelung umfasst eine gründliche Entgasung während der Vakuumphase, gefolgt von der Zufuhr von hochreinem, feuchtem Wasserstoff und anschließender Umwandlung in trockenen Wasserstoff, wodurch Rest-Sauerstoff und -Kohlenstoff vollständig entfernt werden. Der gesamte Sinterzyklus dauert mehrere Stunden; jegliche Temperaturüberschreitung oder Atmosphärenschwankung gilt als katastrophaler Kontrollverlust.

4.3.3 Sinterverdichtungsmechanismus: Porositätskontrolle und Leistungskorrelation

Wolframlegierungsdüsen durchlaufen einen typischen dreistufigen Flüssigphasensinterprozess: In der ersten Stufe erfolgt die Partikelumlagerung durch Kapillarkräfte in der Flüssigphase, was zu einer schnellen Verdichtung führt. In der zweiten Stufe, der Auflösungs- und Wiederausfällungsphase, wird der Porenverschluss durch das Einschließen kleinerer Partikel durch größere sowie die Auflösung und Ausfällung von Wolfram in der Binderphase abgeschlossen. Die dritte Stufe, die Festkörperdiffusion, beseitigt verbleibende intragranulare Mikroporen. Die endgültigen Eigenschaften korrelieren stark mit der Porosität: Kugelförmige, geschlossene Poren sind extrem selten und klein und haben nahezu keinen Einfluss auf Festigkeit und Verschleißfestigkeit. Verbundene Poren oder Korngrenzenporen hingegen bilden den Ausgangspunkt für Erosion und Kavitation. Daher setzen Unternehmen Methoden wie die Verlängerung der Hochtemperaturisolierung, die Optimierung der Binderphasenmenge und die Mikrolegierung ein, um anomales Wachstum zu unterdrücken und die Porosität unter die Nachweisgrenze zu senken. Dadurch erreichen die Düsen ihre theoretische Dichte, Härte und Lebensdauer.

4.3.4 Vermeidung von Sinterfehlern: Maßnahmen zur Kontrolle von Rissbildung und Verformung

Sinterfehler (Rissbildung, Verformung, Blasenbildung, Entmischung) sind die häufigsten Ursachen für Produktionsausfälle bei Düsen. Präventive Maßnahmen bilden einen systematischen Regelkreis: Vor dem Einlegen in den Ofen werden die Rohlinge zu 100 % gewogen und visuell geprüft, um versteckte Risse und Dichteanomalien zu erkennen. Der Ofen verwendet ein spezielles Molybdänschiffchen oder eine Graphitauflage in Kombination mit Wolframpartikeln, um Adhäsion und lokale Spannungen vollständig zu vermeiden. Die Heiz- und Kühlraten werden streng stufenweise gesteuert, insbesondere in der Erstarrungszone der Bindemittelphase. Durch extrem langsames Abkühlen wird die Überlagerung von thermischen Spannungen und Phasenumwandlungsspannungen verhindert. Während der Haltephase erfolgt eine Mehrpunkt-Infrarot-Echtzeitüberwachung. Bei lokaler Überhitzung wird sofort eingegriffen. Nach dem Verlassen des Ofens wird jede Düse einer Fluoreszenz- und dreidimensionalen Morphologieprüfung unterzogen. Düsen mit Verdacht auf Verformung oder Mikrorisse werden entweder direkt zum Nachbrennen in den Ofen zurückgeführt oder verschrottet. Diese Null-Toleranz-Mentalität,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nach der „lieber ein Rohling verschwendet wird, als dass auch nur ein einziger Fehler unentdeckt bleibt“, gewährleistet die absolute Zuverlässigkeit der aus dem Ofen kommenden Düsen und hat den Mythos begründet, dass Wolframlegierungsdüsen nach dem Sinter „fertige Produkte“ seien. Die optimale Kontrolle des Sinterprozesses ist zum unüberwindbarsten Hindernis zwischen führenden Unternehmen und gewöhnlichen Zulieferern geworden.

4.4 Nachbearbeitungstechnologie für Wolframlegierungsdüsen: Verbesserung von Präzision und Leistung

Die Nachbearbeitung ist der letzte Schritt, um Wolframlegierungsdüsen von der Annäherung an die theoretische Dichte zur vollen theoretischen Leistung zu führen. Sie ist auch der entscheidende Schritt, um den Sinterblock in einen präzisen Funktionskörper zu verwandeln, der direkt in die Maschine eingesetzt werden kann und sofort höchste Strahlqualität erzielt. Sie umfasst Präzisionsbearbeitung, Oberflächenveredelung, abschließende Maßkalibrierung und die Sicherstellung höchster Reinheit. Jeder Fehler in diesem Prozess macht alle vorherigen Bemühungen zunichte. Führende Unternehmen haben die Nachbearbeitung auf ein Niveau gehoben, das sich durch absolute Präzision im Mikrometerbereich und das Streben nach Perfektion im Nanometerbereich auszeichnet.

4.4.1 Präzisionsbearbeitung: Bearbeitungstechnologie für Strömungskanäle und Stirnflächen

Die Präzisionsbearbeitung ist die ultimative Realisierung der Düsengeometrie. Der Laval-Strömungskanal mit seinem extrem hohen Längen-Durchmesser-Verhältnis wird durch mehrstufiges Diamanthonen in Kombination mit Ultraschall-Tieflochbearbeitung bearbeitet. Zunächst gewährleisten hochsteife Hartmetallführungen die Koaxialität, anschließend erzielt das progressive Honen eine perfekte Rundheit und Zylindrizität des Kanalhalses. Komplexe konische Oberflächen und Expansionsabschnitte werden zunächst mittels 5-Achs-Drahterodieren geformt, gefolgt von CNC-Profilerschleifen und einer geschlossenen Feinbearbeitung mit einem optischen Profilometer. Die Stirnflächen und Außendurchmesser werden dann durch ultrapräzises Drehen und spitzenloses Schleifen bearbeitet, was zu einem Rundlauf der Stirnflächen im Submikrometerbereich und einer Rundheit des Außendurchmessers führt. Der gesamte Bearbeitungsprozess findet in einem temperatur- und feuchtigkeitskontrollierten Reinraum statt. Alle Werkzeuge und Vorrichtungen sind aus Invar-Stahl oder Keramik mit extrem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten gefertigt, wodurch die vollständige Übereinstimmung zwischen den kaltverarbeiteten Maßen und den Maßen im Hochtemperatureinsatz gewährleistet wird.

4.4.2 Oberflächenbehandlungsverfahren: Polier- und Beschichtungsverbesserungstechnologien

Durch die Oberflächenbehandlung wird die Düseninnenwand von „glatt“ in einen Zustand „extrem glatt und gleichzeitig extrem hart“ verfeinert. Ein dreistufiges Verfahren aus Fließpolieren, magnetorheologischem Polieren und plasmaelektrolytischem Polieren erzielt problemlos eine spiegelglatte oder sogar optische Oberflächenrauheit und beseitigt mikroskopische Kratzer und Haftstellen vollständig. Anschließend wird, abhängig von den Betriebsbedingungen, eine Borinfiltration

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zur Bildung einer extrem harten Wolframboridschicht oder eine PVD/CVD-Abscheidung von TiAlN durchgeführt. CrN-, DLC- oder mehrlagige Nanokompositbeschichtungen werden aufgebracht, um die Oberflächenhärte weiter zu erhöhen, den Reibungskoeffizienten zu reduzieren und die Antihalt- und Korrosionsbeständigkeit zu maximieren. Die Haftung zwischen Beschichtung und Substrat wird durch Gitterschnitt-, Eindring- und Temperaturwechseltests strengstens geprüft, um sicherzustellen, dass die Beschichtung auch nach Tausenden von Betriebsstunden unter Erosion nicht abblättert oder reißt. Durch die Oberflächenbehandlung wird die Düseninnenwand zur optimalen Grenzfläche, an der „Partikel nicht abbremsen, Tropfen nicht verweilen und Korrosion keine Chance hat“.

4.4.3 Dimensionskalibrierung: Präzisionsmess- und Korrekturverfahren

Die Dimensionskalibrierung ist der letzte, entscheidende Schritt bei der Düsenkalibrierung. Jede Düse durchläuft vor Auslieferung drei hochpräzise Messungen in Originalgröße: Ein pneumatisches Messgerät erfasst den Halsdurchmesser und die Rundheit; ein Weißlichtinterferometer scannt das konische Oberflächenprofil; und eine Koordinatenmessmaschine überprüft die Koaxialität und den Rundlauf der Stirnfläche. Alle Daten generieren eine eindeutige digitale Identifikationsnummer. Jede Dimension, die die Toleranz überschreitet, wird sofort korrigiert: Die Halsmikroaufweitung erfolgt mittels Diamant-Einpunkt-Schleifen; Abweichungen der konischen Oberfläche werden durch CNC-optisches Formschleifen korrigiert; und der Rundlauf der Stirnfläche wird durch Ultrapräzisionsdrehen mit sekundärer Werkzeugeinstellung ausgeglichen.

4.4.4 Reinigung und Trocknung des Fertigprodukts: Spezifikationen des Verfahrens zur Entfernung von Verunreinigungen

Einsatz, das Ultraschall, Hochdruckreinigung und Vakuumdestillation mit Reinstwasser kombiniert. Zunächst entfernt ein spezielles neutrales Reinigungsmittel Prozessöl und Metallspäne. Anschließend wird abwechselnd mit deionisiertem Wasser und Isopropanol gespült. Abschließend erfolgen in einem Reinraum der Klasse 100 eine mehrstufige Vakuumtrocknung und Stickstoffspülung, um sicherzustellen, dass sich keine Restpartikel, Ölfilme oder Wasserflecken in den inneren Strömungskanälen und auf den Außenflächen befinden. Nach Verlassen der Trockenkammer wird die Düse sofort vakuumversiegelt und bis zum Öffnen der Verpackung durch den Anwender mit hochreinem Stickstoff geschützt. Der gesamte Reinigungs- und Trocknungsprozess umfasst die vollständige Partikelzählung, die Oberflächenspannungsmessung und die Detektion von Restionen. Diese äußerst sorgfältige Nachbearbeitung verwandelt die Wolframlegierungsdüse von einem Sinterrohling in ein hochpräzises Funktionsbauteil, das die Qualität des Endprodukts direkt bestimmt und somit seine wichtige Position in der globalen High-End-Fertigungskette festigt.

4.5 Qualitätskontrolle der Rohmaterialphase für Wolframlegierungsdüsen

Die Qualitätskontrolle der Rohstoffe ist die erste Verteidigungslinie, um sicherzustellen, dass Wolframlegierungsdüsen über Tausende von Betriebsstunden intakt und über Zehntausende von Betriebsstunden driftfrei bleiben. Selbst geringste Verunreinigungen im ppm-Bereich,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Partikelgrößenabweichungen im Mikrometerbereich oder eine Zusammensetzungsinhomogenität von nur einem Prozent können unter den nachfolgenden extremen Betriebsbedingungen zu katastrophalen Ausfällen führen. Führende Unternehmen haben die Pulverprüfung von reinen Stichproben auf ein System mit Null-Toleranz umgestellt, das den gesamten Prozess, alle Chargen, alle Elemente und alle Leistungsaspekte abdeckt.

4.5.1 Reinheitsprüfung von Wolframpulver

Die Reinheitsprüfung von Wolframpulver erfolgt mittels einer mehrstufigen Kreuzvalidierungsstrategie mit vollständiger Elementabdeckung. Jede Wolframpulvercharge wird gleichzeitig mittels Glimmentladungs-Massenspektrometrie (GDMS), induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS), Infrarot-Wärmeleitfähigkeitsmessung unter Inertgas-Schmelzbedingungen und Verbrennungs-Infrarot-Absorptionsspektroskopie untersucht, um systematisch über dreißig wichtige Verunreinigungen, darunter Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel, Phosphor, Molybdän, Eisen, Nickel, Kobalt und Alkalimetalle, zu identifizieren. Die Probenahme erfolgt an drei Punkten an der Vorder- und Rückseite des Reduktionsofenschiffchens, um eine gleichbleibende Reinheit der gesamten Charge zu gewährleisten. Überschreitet eine Verunreinigung den Grenzwert, wird die gesamte Wolframpulvercharge sofort versiegelt und der Reduktionsofennummer sowie der Wolframoxidcharge zugeordnet. Erst wenn alle Prüfberichte belegen, dass das Wolframpulver die internen Kontrollstandards auf Düsenebene deutlich übertrifft, darf es in die Legierungsphase gelangen.

4.5.2 Prüfverfahren zur Bestimmung der Gleichmäßigkeit der Legierungspulverzusammensetzung

Die Gleichmäßigkeit der Legierungspulverzusammensetzung ist entscheidend für die Chargenkonsistenz der endgültigen Mikrostruktur und der Eigenschaften. Das Prüfverfahren basiert auf einem dreistufigen, geschlossenen Regelkreis: makroskopische Analyse, mikroskopische Analyse und statistische Analyse.

- Es werden Proben vom Anfang und Ende jeder Pulvercharge aus dem Mischbehälter entnommen und der Gehalt an Haupt- und Spurenelementen wie Nickel, Eisen, Kupfer, Molybdän und Seltenerdmetallen mittels ICP-OES und Röntgenfluoreszenzspektrometrie (RFA) bestimmt. Die Abweichung muss innerhalb eines extrem engen Kontrollbereichs liegen.
- Mikroebene: Rasterelektronenmikroskopie + energiedispersive Röntgenspektroskopie und Elektronenstrahl-Mikroanalyse (EPMA) werden eingesetzt, um die Integrität der Bindemittelphasenbeschichtung und die Gleichmäßigkeit der Elementverteilung auf der Oberfläche der Wolframpartikel Schicht für Schicht zu untersuchen und so lokale Entmischungen oder freiliegende Wolframbereiche zu eliminieren.
- Auf statistischer Ebene: Laserpartikelgrößen- und Bildanalysesoftware zählt automatisch Tausende von Kompositpartikeln, um eine hohe Gleichmäßigkeit der Deckkraft und Dickenverteilung der Bindemittelphase zu gewährleisten. Erst wenn alle drei Prüfschritte erfolgreich abgeschlossen sind und ein eindeutiger Bericht zur Chargenzusammensetzung erstellt wurde, wird das Pulver freigegeben. Diese nahezu obsessive Gleichmäßigkeitskontrolle

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

stellt sicher, dass sich die Düsenleistungskurven verschiedener Chargen und Arbeitsgruppen, die mit derselben Rezeptur hergestellt wurden, nahezu vollständig decken.

4.5.3 Prüfung der physikalischen Eigenschaften von Pulvern

Die physikalischen Eigenschaften des Pulvers bestimmen direkt die Wiederholbarkeit des Formgebungs- und Sinterprozesses; jede Charge muss einen vollständigen Satz standardisierter Tests durchlaufen.

- Partikelgröße und -morphologie: Die Kombination eines Laserbeugungs-Partikelgrößenanalysators mit einer Rasterelektronenmikroskopie-Bildanalyse gewährleistet die strenge Kontrolle der Fisher-Partikelgröße, der Partikelgrößenverteilungsbreite und der Sphärizität.
- Fließfähigkeit und Schüttdichte: Die Ergebnisse der drei Methoden, einschließlich Hall-Durchflussmesser, Scott-Volumenmesser und Drehtrommelmethode, müssen in hohem Maße übereinstimmen.
- Spezifische Oberfläche und Stampfdichte: BET-Stickstoffadsorptionsmethode und Stampfdichtemessgerät zur Überprüfung der Pulveraktivität und Füllkapazität.
- Kompressibilität und Granulierfestigkeit: Spezielle Verdichtungstests ermitteln das Dichteverhalten des Pulvers und die Festigkeit des Grünlings unter Formpressung. Alle Prüfgeräte sind regelmäßig auf nationale Normen rückführbar, und die Prüfumgebung unterliegt konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Die Proben werden während des gesamten Prozesses mit Stickstoff geschützt. Die Prüfdaten werden automatisch in Chargenqualitätsdateien hochgeladen und bilden so eine lückenlose Rückverfolgbarkeitskette mit den nachfolgenden Grünlingen, Sinterkörpern und der Leistung des Fertigprodukts. Nur Pulver, deren physikalische Eigenschaften vollständig im optimalen Prozessfenster liegen, werden als „Düsenpulver“ gekennzeichnet und für den Formprozess freigegeben. Die extrem strenge Qualitätskontrolle im Rohmaterialstadium gewährleistet, dass Wolframlegierungsdüsen vom ersten Gramm Pulver an völlig frei von Zufälligkeiten, Schwankungen und zufälligen Ausfällen sind.

4.6 Qualitätskontrolle von Wolframlegierungsdüsen während der Formgebungs- und Sinterphasen

Die Formgebungs- und Sinterphasen sind die entscheidenden Phasen der Umwandlung von Wolframlegierungsdüsen aus losem Pulver in hochleistungsfähige Funktionsbauteile. Gleichzeitig ist dies die anfälligste Phase für Probleme wie Dichtegradierten, Restporosität, Gefügesegregation und Rissbildung/Verformung. Führende Unternehmen haben ein umfassendes, rückverfolgbares und fehlertolerantes Qualitätskontrollsystem etabliert. Jeder Rohling und jede Sintercharge verfügt über eine eigene digitale Datei. Jede festgestellte Anomalie führt sofort zu einem Produktionsstopp, der Abdichtung, einer Ursachenanalyse und umfassenden präventiven Verbesserungen. So wird sichergestellt, dass die fertigen Düsen, die das Werk verlassen, in Dichte, Gefüge und Leistung chargenübergreifend fehlerfrei sind.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.6.1 Verfahren zur Prüfung der Dichte und Kompaktheit des Rohlings

Dichte und Kompaktheit des Rohlings sind die entscheidenden Indikatoren für die Formqualität und bestimmen direkt, ob das nachfolgende Sintern die theoretische Dichtegrenze erreicht. Die Prüfung erfolgt nach einem strengen Verfahren der „Multi-Methoden-Kreuzvalidierung + flächendeckenden Probenahme“. Jede Rohlingscharge wird unmittelbar nach dem Entformen oder isostatischen Pressen gewogen und ihre scheinbare Dichte berechnet. Gleichzeitig werden dünne Scheiben vom Anfang, der Mitte und dem Ende jeder Charge entnommen, um die Dichte mithilfe des Archimedisches Prinzips präzise nachzumessen. Lange Rohlinge werden zusätzlich axial in fünf Abschnitte unterteilt, um Dichte-Totzonen oder Delaminationen durch Kompression auszuschließen. Bei isostatisch gepressten Rohlingen werden außerdem industrielle Computertomographie (CT) und zerstörungsfreie Ultraschallprüfung eingesetzt, um eine vollständige dreidimensionale Dichteverteilungskarte zu erstellen, die Dichtetäler oder lokale Lockerungszonen hervorhebt. Metallografische Proben werden aus den kritischen Bereichen der Formhalsverengung und des Strömungskanal entnommen. Mithilfe einer Bildanalysesoftware werden die Verteilung der komprimierten Partikelzwischenräume und der vorläufige Zustand der Formhalsverbindung statistisch analysiert. Erst wenn die scheinbare Dichte, die Verdrängungsdichte und die CT-Dichte exakt übereinstimmen und innerhalb des extrem engen Bereichs des theoretischen Wertes liegen, werden die Rohlinge als „sintergeeignete Rohlinge“ gekennzeichnet und für den Vorbrandofen freigegeben. Jeder Grünling mit zu geringer oder ungleichmäßiger Dichte wird auf die Pulvercharge, die Pressparameter und den Bediener zurückgeführt und wird nicht freigegeben. Diese akribische Kontrolle der Grünlingdichte gewährleistet, dass der nachfolgende Sinterprozess von Anfang an mit der optimalen theoretischen Dichte beginnt.

4.6.2 Zusammensetzungs- und Mikrostrukturanalyse des Sinterkörpers

Die Zusammensetzung und Mikrostruktur des Sinterkörpers bilden die mikroskopische Grundlage für die endgültige Leistungsfähigkeit der Düse; jegliche Entmischung, anomale Phasen oder Restporosität gelten als schwerwiegende Defekte. Die Analyse erfolgt in einem dreistufigen, geschlossenen Verfahren: makroskopische quantitative Analyse, qualitative Mikroanalyse und statistische Verifizierung. Aus jedem Sinterprozess eines Ofens werden drei vollständige Düsen (erste, mittlere und letzte) entnommen. Mittels Röntgenfluoreszenzspektrometrie und ICP-OES wird die Übereinstimmung der Haupt- und Spurenelementgehalte mit der Rezeptur überprüft. Anschließend werden metallografische Proben aus vier Schlüsselbereichen entnommen: dem Düsenhals, der Kegeloberfläche, dem Erweiterungsbereich und der Außenwand. Nach präziser Einbettung, Schleifen, Polieren und selektivem Ätzen werden die metallografischen Proben systematisch unter einem hochauflösenden Lichtmikroskop und einem Rasterelektronenmikroskop untersucht, um die Morphologie der Wolframpartikel, die Verteilung der Bindemittelphase, die Korngrenzenreinheit, die Porenmorphologie und die Ausscheidung der zweiten Phase zu bestimmen. Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDS) und Elektronenstrahl-Mikroanalyse wurden eingesetzt, um die Verteilung von Elementen wie Nickel, Eisen, Kupfer und Molybdän genauer zu untersuchen und lokale Entmischungs- oder Anreicherungszone auszuschließen. Bei speziellen Formulierungen wurden Korngrenzenpräzipitate und Versetzungskonfigurationen mittels Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) untersucht, um zu bestätigen, ob die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mikrolegierungselemente die erwartete Dispersionshärtung bewirken. Alle Bilder und Spektren wurden von erfahrenen Metallographen einzeln ausgewertet, die detaillierte Berichte erstellten. Nur Sinterkörper mit einem durchgehenden Wolframgerüst, gleichmäßiger Bindemittelbeschichtung, vollständig geschlossenen Poren und ohne anomale Phasen wurden als geeignet für die Mikrostruktur eingestuft. Diese mikroskopische Analyse auf nahezu wissenschaftlichem Niveau ermöglichte es, die Mikrostruktur der Düse hinsichtlich theoretischer Struktur, theoretischer Leistung und Fehlerfreiheit zu optimieren.

4.6.3 Probenahme- und Prüfvorgaben für die mechanischen Eigenschaften von Sinterkörpern

Die Probenahme und Prüfung der mechanischen Eigenschaften von Sinterkörpern ist der letzte Kontrollpunkt für die Qualitätsfreigabe während des Formgebungs- und Sinterprozesses. Die Norm sieht eine dynamische Probenahmestrategie vor: „Vollständige Prüfung aller Bauteile zu Beginn, in der Mitte und am Ende des Ofens + zusätzliche Stichproben + Verdopplung der Probenahme bei Abweichungen.“ Für jeden Ofen werden die erste, die mittlere und die letzte vollständige Düse beprobt. Standardisierte Zug-, Schlag-, Härte- und Bruchzähigkeitsproben werden oberhalb des Düsenhalses für die Prüfung der mechanischen Eigenschaften bei Raumtemperatur und hohen Temperaturen entnommen. Zusätzliche Düsen werden stichprobenartig für eine vollständige Wiederholungsprüfung ausgewählt; jegliche Leistungsschwankungen werden sofort verdoppelt, bis der gesamte Ofen geprüft ist. Die Härte wird an mehreren Punkten am Düsenhals, an der Innenwand und an der Außenwand sowohl nach Vickers als auch nach Rockwell gemessen, um eine vollständige Härtegradientenkarte zu erstellen. Zugproben dienen der Beurteilung des Verhältnisses von Zugfestigkeit und Dehnung; Schlagproben der Beurteilung der Tieftemperatur- und Hochtemperaturzähigkeit; und Bruchzähigkeitsproben der Beurteilung des Rissausbreitungswiderstands. Alle Bruchflächen werden mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) analysiert, um sicherzustellen, dass der Bruchmodus vollständig den erwarteten Merkmalen von Grübchenbildung und Quasi-Spaltbruch entspricht und spröder interkristalliner oder durch Porosität bedingter Bruch ausgeschlossen wird. Die Daten zu den mechanischen Eigenschaften bilden zusammen mit den entsprechenden Berichten zu Pulverchargen, Grünkörperdichte und Mikrostruktur ein vollständiges, geschlossenes Archiv. Nur Sinterkörper, deren Leistungsindikatoren durchgehend im optimalen Bereich liegen und eine extrem hohe Chargenübereinstimmung aufweisen, werden für die Nachbearbeitung freigegeben. Jede Abweichung von den Leistungsindikatoren führt sofort zur Ofenabschaltung, Versiegelung, vollständigen Rückverfolgbarkeit der Produktionskette und zur Einleitung präventiver Verbesserungen, bis das Problem vollständig behoben ist. Dieser kompromisslose Prüfstandard für die mechanischen Eigenschaften hat es ermöglicht, dass die Düsenformungs- und Sinterprozesse der Wolframlegierung das industrielle Wunder vollbringen, „jeden Ofen wie den ersten und jede Düse wie eine Musterdüse zu behandeln“.

4.8 Qualitätskontrollsystem und Normen für Wolframlegierungsdüsen

Die Fertigung von Wolframlegierungsdüsen hat das traditionelle Modell der Stichprobenprüfung und Dokumentation längst hinter sich gelassen und sich zu einem industriellen Qualitätsmanagementsystem entwickelt, das den gesamten Lebenszyklus abdeckt, Fehler eliminiert, Echtzeit-Audits ermöglicht und rechtliche Verantwortlichkeit gewährleistet. Führende Unternehmen vergeben für jedes Gramm Pulver,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

jeden Rohling, jeden Sinterkörper, jeden Prozess und jede fertige Düse eine eindeutige digitale ID. So entsteht eine lückenlose Qualitätskette, die vom Wareneingang des Wolframkonzentrats bis zu zehntausenden Betriebsstunden nach der Installation durch den Anwender präzise nachvollziehbar ist.

4.8.1 Einrichtung eines umfassenden Rückverfolgbarkeitssystems für die Qualitätssicherung von Wolframlegierungsdüsen

Das durchgängige Qualitätsrückverfolgbarkeitssystem, basierend auf einer industriellen Internetplattform, integriert MES-, ERP-, LIMS- und Blockchain-Technologien, um eine lückenlose Datenerfassung vom Rohmaterial über das Fertigprodukt bis hin zum Einsatzort beim Anwender zu gewährleisten. Jede Charge Wolframpulver, die in das Werk gelangt, generiert eine eindeutige Master-Chargennummer. Diese wird anschließend in Unterchargennummern, Blocknummern, Sinterofennummern, Bearbeitungsauftragsnummern, Seriennummern des Fertigprodukts und schließlich in einen per Laser auf die Außenwand der Düse aufgetragenen QR-Code unterteilt. Alle wichtigen Parameter (Zusammensetzung, Dichte, Härte, Abmessungen, Mikrostruktur, mechanische Eigenschaften, Oberflächenrauheit) werden in Echtzeit in die Cloud hochgeladen und dauerhaft mit der entsprechenden Chargennummer verknüpft. So entsteht ein unveränderliches digitales Archiv. Anwender können einfach den QR-Code der Düse scannen, um sofort auf deren vollständige Historie – vom Erz bis zum Werk – zuzugreifen und sogar Betriebsstunden und Wartungsnachweise am Einsatzort einzusehen. Bei Abweichungen kann das System innerhalb von Sekunden die genaue Ofennummer, den Bediener, die Ausrüstung, die Umgebungstemperatur und -feuchtigkeit sowie den Luftdruck des jeweiligen Tages ermitteln und so klare Verantwortlichkeiten und präzise Verbesserungen gewährleisten. Dieses durchgängige, visualisierte und nachvollziehbare System ermöglicht es, dass Wolframlegierungsdüsen den höchsten Qualitätsstandard erreichen: „Null versteckte Gefahren, keine Verantwortungsverweigerung und keine Reue“.

4.8.2 Festlegung wichtiger Qualitätskontrollpunkte

Kritische Qualitätskontrollpunkte (CCPs) werden gemäß der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) nach Risiko eingestuft und umfassen mehr als zehn unüberwindbare Schwellenwerte: Reinheit des Wolframpulvers und Gleichmäßigkeit des Legierungspulvers im Rohmaterialstadium; Gleichmäßigkeit der Blockdichte im Formgebungsstadium; Restkohlenstoffgehalt und Spannungsabbau im Vorsinterstadium; maximale Temperatur und Taupunkt der Atmosphäre im Sinterstadium; Halsdurchmesser und Innenwandrauheit im Nachbearbeitungsstadium; Haftung der Beschichtung im Oberflächenbehandlungsstadium; abschließende Maßkalibrierung und Reinheit; sowie 100% ige Dichtheitsprüfung und Überprüfung der Strahlleistung des Endprodukts. Jeder Kontrollpunkt ist mit einem doppelten Schutz ausgestattet: Online-Echtzeitüberwachung und Offline-Präzisionsprüfung. Jede Abweichung vom festgelegten Bereich löst sofort einen automatischen Alarm aus, sperrt die Maschine, isoliert fehlerhafte Produkte und fordert eine 8D-Ursachenanalyse sowie Präventivmaßnahmen an. Die CCP-Daten werden täglich in einem visualisierten Qualitäts-Dashboard dargestellt und von der Geschäftsleitung und dem technischen Team in den täglichen Morgenbesprechungen überprüft. Jede Trendabweichung führt zu einem sofortigen Produktionsstopp zur Verbesserung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.8.3 Branchenübliche Qualitätsstandards und Konformitätsanforderungen

Wolframlegierungsdüsen unterliegen einem zweistufigen Konformitätssystem: Internationale Normen bilden die Grundlage, während interne Kontrollstandards deutlich strenger sind als nationale. Extern hält sich das Unternehmen strikt an Zertifizierungen wie ISO 9001, IATF 16949, AS9100, ISO 13485 (medizinische Qualität) und NADCAP (für thermisches Spritzen). Die wichtigsten Prozesse erfüllen die Spezifikationen von AMS, ASTM und DIN für Wolframlegierungen und Düsen. Oberflächenbeschichtungen entsprechen den Umweltrichtlinien RoHS, REACH und ELV, und die Reinheit erfüllt die Anforderungen der ISO 14644 Klasse 100. Intern implementiert das Unternehmen die „China Tungsten Intelligent Manufacturing Nozzle-Level Internal Control Specification“, die internationale Standards weit übertrifft. Über dreißig Indikatoren, darunter Dichte, Härte, Maßtoleranzen, Oberflächenrauheit, mechanische Eigenschaften und Mikrostruktur, sind um ein Vielfaches strenger als internationale Standards und verkörpern damit den Grundsatz: „Internationale Standards sind die Mindestanforderung, unternehmensinterne Standards sind die Grundlage.“ Das Unternehmen unterzieht sich jährlichen Vor-Ort-Inspektionen durch anerkannte Drittorganisationen und wichtige Kunden. Alle Aufzeichnungen werden dauerhaft archiviert. Das Unternehmen ist jederzeit bereit, Audits von Kunden weltweit durchzuführen. Dieses duale System aus internen und externen Qualitätsstandards und Compliance übertrifft den Branchendurchschnitt deutlich. Dadurch sind Wolframlegierungsdüsen nicht nur führend in puncto Prozessleistung, sondern auch die zuverlässigste, berechenbarste und vertrauenswürdigste Schlüsselkomponente in der globalen High-End-Fertigungskette. Das extrem strenge Qualitätskontrollsystem und die hohen Standards haben dem Unternehmen seinen exzellenten Ruf für „konstant hohe Qualität über Tausende von Chargen und eine problemlose Produktion“ eingebracht und einen Wettbewerbsvorteil geschaffen, den gewöhnliche Anbieter nicht erreichen können.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsdüsen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 5 Vergleich von Wolframlegierungsdüsen mit Düsen aus anderen Materialien

5.1 Vergleich von Düsen aus Wolframlegierung und Düsen aus Edelstahl

Edelstahldüsen (typischerweise 316L, 17-4PH, 440C usw.) dominierten lange Zeit die Bereiche Industriereinigung, allgemeines thermisches Spritzen und Wasserstrahlschneiden bei niedrigem bis mittlerem Druck. Mit dem stetigen Anstieg von Betriebstemperatur, Druck, Abrasivhärte und Reinheitsanforderungen wurde ihre Leistungsfähigkeit jedoch von Wolframlegierungsdüsen deutlich übertroffen. Die beiden Düsentypen sind nicht mehr austauschbar, sondern durch die Betriebsbedingungen klar voneinander abgegrenzt. Wolframlegierungsdüsen besetzen die Spitzenpositionen und extremen Anwendungsbereiche, während Edelstahldüsen in den Bereich der weniger anspruchsvollen und moderaten Betriebsbedingungen zurückgedrängt wurden.

5.1.1 Vergleich der Hochtemperaturbeständigkeit: Temperaturtoleranzbereich und Stabilität

Edelstahldüsen beginnen oberhalb von 600 °C deutlich zu erweichen und zu oxidieren. Ihre Festigkeit nimmt bei 800 °C rapide ab, wodurch sich eine lose Oxidschicht bildet, die sich kontinuierlich ablöst. Dies führt zu einer schnellen Erweiterung des Düsenhalses und Turbulenzen im Strahl. Wolframlegierungsdüsen hingegen besitzen einen extrem hohen Schmelzpunkt nahe dem von reinem Wolfram und eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen Hochtemperaturoxidation. Sie behalten ihre Härte und Formstabilität über lange Zeiträume in Flammen mit Temperaturen von über 1500 °C und kurzzeitig über 2000 °C bei. Dabei bildet sich lediglich eine sehr dünne und fest haftende Schutzschicht auf der Oberfläche, die sich kaum ablöst.

5.1.2 Vergleich der Verschleißfestigkeit: Unterschiede in Verschleißrate und Lebensdauer

In Umgebungen mit hoher Erosionsgeschwindigkeit und harten Abrasivstoffen ist der Verschleiß von Edelstahldüsen typischerweise um ein Vielfaches höher als der von Wolframlegierungsdüsen. Siliziumkarbid-, Granat- und diamantartige Abrasivstoffe erzeugen tiefe Rillen und starke plastische Verformungen auf der Edelstahloberfläche, was oft innerhalb weniger hundert Stunden zu einer deutlichen Vergrößerung des Düsenhalsdurchmessers und einem kontinuierlichen Anstieg des Strahldivergenzwinkels führt. Im Gegensatz dazu hinterlassen Wolframlegierungsdüsen mit ihrem nahezu durchgehenden, hochharten Wolframgerüst nur sehr flache Spuren von Abrasiveinschlägen, und der Düsenhals behält seine ursprüngliche Größe auch nach Tausenden oder sogar Zehntausenden von Stunden bei, wobei sich die Strahlparameter nahezu nicht verändern.

5.1.3 Vergleich der mechanischen Eigenschaften: Analyse der Kompatibilität zwischen Festigkeit und Zähigkeit

Edelstahldüsen weisen bei Raumtemperatur eine gute Festigkeit und Zähigkeit auf, verschleißen jedoch unter kombinierter Hochtemperatur- und Ultradruckbelastung rasch, was leicht zu Ermüdungsrissen und plastischer Verformung führt. Wolframlegierungsdüsen hingegen behalten über den gesamten

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 1000 °C eine extrem hohe Festigkeit und nahezu duktile Zähigkeit. Ihre Zugfestigkeit, Druckfestigkeit und Dauerfestigkeit sind deutlich höher, und sie zeigen unter Ultrahochdruck-Wasserschlag und starkem Rückstoß nahezu keine bleibende Verformung. Unter extremen mechanischen Bedingungen wie Ultrahochdruck-Wasserstrahlen (über 400 MPa) und Hochleistungs-Plasmaspritzpistolen versagen Edelstahldüsen häufig vorzeitig durch Rissbildung oder Kollaps, während Wolframlegierungsdüsen mit ihrer Bruch- und Verformungsbeständigkeit über lange Zeiträume zuverlässig funktionieren und somit das einzige Düsenmaterial darstellen, das gleichzeitig höchste Festigkeit und ausreichende Zähigkeit gewährleistet.

5.1.4 Wirtschaftlicher Vergleich: Umfassende Bewertung der Kosten und Wartungskosten

Eine Wolframlegierungsdüse, deren Gesamtlebenszykluskosten (TCO) jedoch wesentlich höher sind.

Die Gründe hierfür sind folgende: Austauschhäufigkeit: Edelstahldüsen haben eine kurze Lebensdauer, was häufige Stillstände zum Düsenwechsel erfordert und extrem hohe Kosten für Arbeitsaufwand, Ausfallzeiten und die Entsorgung von Düsenabfällen verursacht. Eine einzelne Wolframlegierungsdüse kann Dutzende anderer ersetzen und reduziert so die Anzahl der Düsenwechsel drastisch. Prozessstabilität: Die schnelle Öffnungserweiterung im Düsenhals von Edelstahldüsen führt zu einer Abweichung der Strahlparameter, was zu geringerer Ausbeute und höherem Ausschuss führt. Wolframlegierungsdüsen halten ihre Parameter langfristig konstant und ermöglichen so eine nahezu 100%ige Ausbeute. Wartungsaufwand: Edelstahldüsen neigen zu Rost, Pulveranhaftung und Verstopfung und müssen regelmäßig mit Säure gereinigt oder ultraschallgereinigt werden. Wolframlegierungsdüsen rosten nicht an den Innenwänden, weisen praktisch keine Pulveranhaftung auf und sind sofort einsatzbereit.

Praxisbeispiele aus der Industrie zeigen, dass die jährlichen Gesamtkosten für Wolframlegierungsdüsen in hochintensiven, kontinuierlichen Produktionslinien nur halb so hoch oder sogar niedriger sind als die von Edelstahldüsen. Die Amortisationszeit beträgt in der Regel weniger als sechs Monate. Wolframlegierungsdüsen haben sich von extrem teuren High-End-Verbrauchsmaterialien zu einer wirklich wirtschaftlichen und sowohl erschwinglichen als auch rentablen Alternative entwickelt. Edelstahldüsen hingegen werden zunehmend als Übergangsprodukte für Anwendungen mit geringer Wertschöpfung eingesetzt. Der Wettbewerb beschränkt sich nicht mehr allein auf den Preis; er spiegelt zwei völlig unterschiedliche industrielle Philosophien wider: „Niedrigste kurzfristige Kosten“ versus „Höchster langfristiger Wert“.

5.2 Vergleich von Wolframlegierungsdüsen und Keramikdüsen

Wolframlegierungsdüsen und Keramikdüsen sind beides hochwertige, verschleißfeste Düsen, unterscheiden sich jedoch deutlich in ihren Materialeigenschaften, Leistungsmerkmalen und Anwendungsbereichen. Wolframlegierungsdüsen mit einem wolframbasierten Verbundkern erzielen ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Härte und Zähigkeit. Keramikdüsen hingegen bestehen hauptsächlich aus nichtmetallischen Keramiken wie Zirkoniumdioxid oder Siliciumcarbid und zeichnen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sich durch extreme Härte und chemische Inertheit aus. Wolframlegierungsdüsen eignen sich besser für kombinierte Hochgeschwindigkeitserosion und Thermoschockbedingungen mit Partikeln, während Keramikdüsen in rein oxidierenden oder stark korrosiven Hochtemperaturmedien ihre Stärken ausspielen. Die beiden Düsenmaterialien haben sich von austauschbaren zu nach Betriebsbedingungen differenzierten Materialien entwickelt und bilden zusammen ein vollständiges Spektrum an Düsenmaterialien für die moderne Strahlbearbeitung.

5.2.1 Vergleich der mechanischen Eigenschaften: Unterschiede in der Schlagzähigkeit und Sprödigkeit

Wolframlegierungsdüsen sind Keramikdüsen in puncto Schlagfestigkeit weit überlegen. Ihre Verbundstruktur ermöglicht eine optimale Synergie zwischen dem harten Wolframpartikelgerüst und dem duktilen Bindemittel, wodurch die Düse über eine ausreichende duktile Dämpfungskapazität verfügt. Selbst bei Hochgeschwindigkeitsaufprall oder plötzlichen Temperaturschocks mit harten Partikeln verformen sie sich nur geringfügig und zerbrechen nicht schlagartig. Obwohl Keramikdüsen härter sind, sind sie von Natur aus extrem spröde. Eine einzige versehentliche Überlastung oder ein kleiner Defekt kann zum vollständigen Bruch führen, insbesondere unter Bedingungen häufiger Vibrationen oder Stöße. Das Versagensmuster ist oft ein plötzlicher, unangekündigter Sprödbruch.

Die Eigenschaften von Wolframlegierungsdüsen beruhen auf der Brückenwirkung der Binderphase. Entstehende Risse werden schnell passiviert und von der duktilen Phase absorbiert, wodurch die Rissausbreitung effektiv blockiert wird. Im Gegensatz dazu breitet sich ein Riss in einer Keramikdüse, sobald er entstanden ist, linear entlang der Korngrenzen oder innerhalb der Körner aus. Sie weisen nahezu keine Zähigkeit auf und sind nicht selbstheilend. Dieser Unterschied zeigt sich deutlich beim thermischen Spritzen und Wasserstrahlschneiden : Wolframlegierungsdüsen widerstehen tausenden Stunden Partikelerosion mit stabilen Düsenhalsabmessungen, während Keramikdüsen aufgrund akkumulierter Mikro- Impulse innerhalb weniger hundert Stunden ausfallen. Wolframlegierungsdüsen sind deutlich weniger spröde als Keramikdüsen und daher die einzige Wahl für komplexe Betriebsbedingungen, die absolute Bruch- und Stoßfestigkeit erfordern. Keramikdüsen eignen sich hingegen besser für statische Belastungen oder rein hochtemperierte, stoßfreie Umgebungen.

5.2.2 Vergleich der Verschleißfestigkeit: Verschleißverhalten gegenüber harten Partikeln und abrasivem Verschleiß

Düsen aus Wolframlegierungen und Keramikdüsen zeichnen sich jeweils durch ihre hervorragende Beständigkeit gegenüber hartem Partikelverschleiß und abrasivem Verschleiß aus. Düsen aus Wolframlegierungen bieten jedoch eine ausgewogenere Gesamtleistung und eignen sich besser für komplexe Betriebsbedingungen. Die Verschleißfestigkeit von Wolframlegierungsdüsen beruht auf dem Zusammenspiel eines durchgehenden Wolframgerüsts und einer duktilen Bindemittelphase: Beim Aufprall harter Partikel bieten die Wolframpartikel einen extrem hohen Widerstand und erzeugen lediglich flache plastische Rillen, während die Bindemittelphase die Aufprallenergie absorbiert und Mikroschäden schnell repariert. Dies führt zu einer sehr geringen und gleichmäßigen Verschleißrate.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Keramikdüsen mit ihrer höheren Härte schneiden bei reinem Hartpartikelverschleiß besser ab, da die Partikel nur schwer in die Oberfläche eindringen können. Sobald jedoch Mikrorisse entstehen, breiten sie sich schnell aus und führen zu Abplatzungen.

In Hochgeschwindigkeits-Luftströmungen mit abrasiven Partikeln, wie sie beispielsweise beim thermischen Spritzen vorkommen, weisen Wolframlegierungsdüsen ein allmähliches, gleichmäßiges Verschleißmuster mit langsamen Änderungen des Düsenhalsdurchmessers, aber stabiler Strahlqualität über einen langen Zeitraum auf. Keramikdüsen hingegen neigen aufgrund partikelinduzierter Risse zu plötzlichem Abplatzen, was zu unvorhersehbarem Ausfall führt. Bei Ultrahochdruck-Wasserstrahlanwendungen mit abrasiven Partikeln absorbieren die Zähigkeit und die Puffereigenschaften von Wolframlegierungsdüsen effektiv die Auswirkungen des Kavitationsblasenkollapses, was zu einer deutlich geringeren Abrasionsverschleißrate als der Ermüdungsabplatzungsrate von Keramikdüsen führt. Insgesamt bieten Wolframlegierungsdüsen eine höhere Verschleißfestigkeit und -beständigkeit, während Keramikdüsen eher hart und kurzlebig sind. Erstere eignen sich hervorragend für kombinierten Stoß- und thermischen Verschleiß, während letztere Vorteile bei rein chemischer Korrosion oder in partikelfreien Hochtemperaturumgebungen bieten.

5.2.3 Vergleich der Verarbeitungsleistung: Formgenauigkeit und Anpassungsfähigkeit an komplexe Strukturen

Wolframlegierungsdüsen sind Keramikdüsen in der Bearbeitungsleistung deutlich überlegen. Ihre Legierungsstruktur bietet ausreichende Zähigkeit und Plastizität, wodurch sich geometrische Strukturen wie komplexe interne Strömungskanäle, variable Querschnittserweiterungen, integrierte Kühlkanäle und Mehrfachdüsenanordnungen durch Pulvermetallurgie, Präzisionsbearbeitung, Tieflochbohren, Drahterodieren und Laserbearbeitung problemlos realisieren lassen. Im Gegensatz dazu birgt die Sprödigkeit von Keramikdüsen ein hohes Risiko von Rissen im Bearbeitungsprozess, und komplexe Strukturen sind mit einfachen Umformverfahren und begrenztem Schleifen kaum realisierbar.

Wolframlegierungs-Düsenrohlinge lassen sich durch Kaltisostatisches Pressen (KIP) mit nahezu jedem Seitenverhältnis formen. Dies führt nach dem Sintern zu einem extrem breiten Bearbeitungsfenster und einer spiegelglatten, splitterfreien Oberfläche. Keramische Düsenrohlinge hingegen neigen zu ungleichmäßiger Schrumpfung und brechen leicht unter Spannungsspitzen während der Bearbeitung. Ihre Formgenauigkeit und Anpassungsfähigkeit an komplexe Strukturen sind deutlich geringer als bei Wolframlegierungen. Wolframlegierungsdüsen lassen sich problemlos löten oder mit Gewinde versehen, während Keramikdüsen beim Verbinden extrem bruchgefährdet sind.

5.2.4 Zuverlässigkeitsvergleich: Analyse der Temperaturwechselbeständigkeit und der Betriebsstabilität

Wolframlegierungsdüsen übertreffen Keramikdüsen hinsichtlich Temperaturwechselbeständigkeit und Betriebsstabilität. Ihre Legierungsverbundstruktur ermöglicht es der zähen Bindungsphase, thermische Spannungen effektiv zu absorbieren und zu verteilen, wodurch selbst nach Tausenden von schnellen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Temperaturwechseln nahezu keine Mikrorisse entstehen. Im Gegensatz dazu reagieren Keramikdüsen extrem empfindlich auf Temperaturwechsel ; bereits ein einziger schneller Temperaturwechsel kann zum Zerschlagen der gesamten Düse führen.

In Thermospritzpistolen überstehen Düsen aus Wolframlegierung Tausende von Zünd- und Löschzyklen ohne Verformung oder Rissbildung, und ihre Düsenhalsabmessungen und der Kegelwinkel bleiben über lange Zeit stabil. Keramikdüsen hingegen neigen unter Temperaturschocks zur Bildung von Netzwerkrissen, was zu einer deutlich geringeren Stabilität führt. Die Temperaturwechselbeständigkeit von Wolframlegierungsdüsen gewährleistet ihre Zuverlässigkeit – „keine Verformung, kein Kontrollverlust“ – unter komplexen Betriebsbedingungen, während Keramikdüsen besser für Umgebungen mit konstanter Temperatur oder geringen Temperaturschocks geeignet sind.

5.3 Vergleich von Wolframlegierungsdüsen und Kupferlegierungsdüsen

Kupferlegierungsdüsen (typischerweise aus Reinkupfer, sauerstofffreiem Kupfer, Chrom-Zirkonium-Kupfer, Aluminiumbronze usw.) wurden aufgrund ihrer hervorragenden Wärmeleitfähigkeit, der geringen Kosten und der einfachen Verarbeitung einst häufig beim Plasmaspritzen, als Wasserstrahlführungsdüsen und in der Tieftemperaturreinigung eingesetzt. Mit der Entwicklung der Prozesse hin zu höheren Temperaturen, stärkerer Erosion und längeren Lebensdauern traten jedoch die Probleme der Kupferlegierungsdüsen hinsichtlich Erweichung, Abtragung, Verschleiß und Verformung immer deutlicher zutage, was zu ihrem vollständigen Ersatz durch Wolframlegierungsdüsen in den meisten High-End-Anwendungen führte. Es hat sich ein klarer Unterschied zwischen den beiden herausgebildet: Kupferlegierungen werden hauptsächlich in Anwendungen mit niedrigen Temperaturen, geringem Abrieb und kurzer Lebensdauer eingesetzt, während Wolframlegierungen in Anwendungen mit hohen Temperaturen, hohem Verschleiß und langer Lebensdauer die Spitzenposition einnehmen.

5.3.1 Vergleich der Festigkeit bei hohen Temperaturen: Erhaltungsrate der mechanischen Eigenschaften unter Hochtemperaturbedingungen

Düsen aus Kupferlegierungen beginnen oberhalb von 400 °C deutlich zu erweichen, und bei 600 °C beträgt ihre Festigkeit nur noch einen Bruchteil der Festigkeit bei Raumtemperatur. Der Düsenhals verformt sich rasch plastisch, kollabiert oder schmilzt sogar in der Hochtemperaturflamme und tropft ab , was zu einem vollständigen Verlust der geometrischen Kontrolle führt. Düsen aus Wolframlegierungen hingegen behalten über den gesamten Temperaturbereich eine extrem hohe Festigkeit. Selbst bei kontinuierlicher Erhitzung auf über 1200 °C oder kurzzeitiger Annäherung an 2000 °C zeigen ihre Härte und Druckfestigkeit nur einen minimalen Abfall, und der Düsenhalsdurchmesser sowie der Kegelwinkel bleiben nahezu unverändert. Dieser Unterschied beruht auf der niedrigen Rekristallisationstemperatur von Kupfer und der schnellen Korngrenzenwanderung bei hohen Temperaturen, während Wolframlegierungen auf den extrem hohen Schmelzpunkt des Wolframgerüsts und die verstärkende Wirkung der Binderphase angewiesen sind, um ein stabiles, hochtemperaturbeständiges und lasttragendes Netzwerk zu bilden. Bei Hochtemperaturverfahren wie dem Überschallflammspritzen, dem atmosphärischen Plasmaspritzen und dem Laserauftragschweißen mit koaxialer Pulverzufuhr werden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kupferlegierungsdüsen aufgrund von Erweichung oft innerhalb von Minuten bis Stunden unbrauchbar, während Wolframlegierungsdüsen über Tausende von Stunden stabil funktionieren. Kupferlegierungsdüsen sind daher bei Hochtemperaturdüsen vollständig vom Markt verschwunden.

5.3.2 Vergleich der Nutzungsdauer: Unterschiede im Dämpfungsverhalten unter verschiedenen Betriebsbedingungen

Die Lebensdauer von Kupferlegierungsdüsen zeigt ein typisches Muster: einen langsamen anfänglichen Abfall, einen beschleunigten Abfall im mittleren Bereich und schließlich ein sprunghaftes Versagen. Anfangs ermöglicht die Duktilität des Kupfers dessen Formstabilität. Sobald die Oberfläche jedoch durch Abrasivstoffe beschädigt oder durch lokale Überhitzung erweicht wird, beschleunigen sich Verschleiß und Verformung dramatisch und führen schließlich zu einem exponentiellen Versagen. Im Gegensatz dazu verläuft die Lebensdauer von Wolframlegierungsdüsen annähernd linear: Das Wolframgerüst sorgt für eine konstant hohe Härte, die Binderphase gewährleistet kontinuierliche Zähigkeit, die Ausdehnung des Düsenhalsdurchmessers ist extrem gering und gut vorhersagbar, und die Strahlqualität bleibt bis zum Ende der Lebensdauer erhalten. Unter typischen Betriebsbedingungen wie dem Ultrahochdruck-Wasserstrahlen mit Abrasivstoffen, der Pulverzuführung beim thermischen Spritzen und der industriellen Reinigung beträgt die Lebensdauer von Kupferlegierungsdüsen typischerweise nur einen Bruchteil der Lebensdauer von Wolframlegierungsdüsen (ein Hundertstel bis ein Siebtel). Zudem verändern sich die Strahlparameter vor dem Versagen deutlich, was zu einer erheblichen Ertragsminderung führt. Düsen aus Wolframlegierungen, die sich durch ihre Stabilität auszeichnen, „tausend Stunden so zu nutzen, als wäre es nur eine Stunde“, minimieren die Häufigkeit des Düsenwechsels und verändern damit die Wahrnehmung der Düsenlebensdauer in der Produktionslinie grundlegend.

5.3.3 Vergleich der Wärmeleitfähigkeit: Eigenschaften der Wärmeleitung und Temperaturverteilung

Kupferlegierungen besitzen eine extrem hohe Wärmeleitfähigkeit, wodurch Wärme mit minimalen Oberflächentemperaturgradienten augenblicklich vom Düsenhals zur Außenwand übertragen wird und theoretisch eine schnelle Wärmeabfuhr ermöglicht wird. In realen Hochtemperatur- und Hochenergieanwendungen erweist sich dieser Vorteil jedoch als fataler Nachteil: Aufgrund unzureichender Hochtemperaturfestigkeit können Kupferlegierungen trotz schneller Wärmeübertragung der daraus resultierenden thermischen Erweichung und Verformung nicht standhalten, was zu einem schnellen Zusammenbruch des Düsenhalses führt. Wolframlegierungsdüsen weisen zwar eine geringere Wärmeleitfähigkeit als Kupferlegierungen auf, jedoch eine deutlich höhere als Keramik und Edelstahl. Dies ist optimal auf ihre extrem hohe Erweichungstemperatur abgestimmt: Die Wärmeleitung ist schnell genug, um die maximale Temperatur im Düsenhals unterhalb eines sicheren Schwellenwerts zu halten, während das Material selbst bei dieser Temperatur eine extrem hohe Festigkeit beibehält. Dies führt zu einer idealen Temperaturverteilung mit „keiner internen Überhitzung und schneller externer Abkühlung“. Beim Hochleistungs-Plasmaspritzen und Laserauftragschweißen kommt es häufig vor, dass Kupferlegierungsdüsen aufgrund lokaler, kurzzeitiger Überhitzung durchbrennen. Wolframlegierungsdüsen hingegen erreichen mit ihrer rationaleren Kopplung von Wärmeleitfähigkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Festigkeit ein perfektes Gleichgewicht zwischen effektiver Wärmeübertragung und Hitzebeständigkeit des Düsenhalses, was zu einer Lebensdauer und Stabilität führt, die die von Kupferlegierungen bei Weitem übertrifft.

5.3.4 Vergleich der Korrosionsbeständigkeit: Korrosionsbeständigkeit in sauren und alkalischen Medien

Reines Kupfer und gewöhnliche Kupferlegierungen sind in sauren Medien (insbesondere Salpetersäure, Schwefelsäure und Königswasser) sehr gut löslich und neigen in alkalischen und chlorhaltigen Medien zu Entzinkung oder Spannungsrisskorrosion. Die Oberfläche bildet schnell poröse Korrosionsprodukte, was zu einer deutlichen Zunahme der Rauheit im Düsenhalsbereich und zu Problemen bei der Durchflussregelung führt. Düsen aus Wolframlegierungen weisen hingegen ein völlig anderes Korrosionsbeständigkeitsprofil auf: Wolfram-Nickel-Eisen-Systeme bewähren sich hervorragend in oxidierenden Hochtemperaturatmosphären, während Wolfram-Nickel-Kupfer-Systeme über den gesamten pH-Bereich nahezu chemisch inert sind, einschließlich Säuren, Laugen, Meerwasser, Salznebel und Desinfektionsmitteln. Sie zeigen kaum sichtbare Korrosion und behalten über lange Zeit eine spiegelglatte Oberfläche. In korrosiven Umgebungen wie der Rostentfernung an Offshore-Windkraftanlagenflügeln, der Säure- und Laugenreinigung von Chemiepipelines, der aseptischen Reinigung in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie sowie der nuklearen Dekontamination zeigen Düsen aus Kupferlegierungen oft schon nach wenigen hundert Stunden Lochfraß, Spaltkorrosion oder vollständige Auflösung. Düsen aus Wolfram-Nickel-Kupfer hingegen behalten nach Tausenden von Stunden ihre makellose Innenwand ohne Metallionenausfällung und erfüllen damit höchste Anforderungen an Reinheit und Biokompatibilität. Dank ihrer absoluten Korrosionsbeständigkeit – sie rosten und lösen sich nicht auf – haben Düsen aus Wolframlegierungen Kupferlegierungen in allen anspruchsvollen Anwendungen mit korrosiven Medien vollständig verdrängt.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsdüsen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 6 : Anwendungsgebiete von Wolframlegierungsdüsen

6.1 Anwendung von Wolframlegierungsdüsen in der industriellen Fertigung

Düsen aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer extremen Temperaturbeständigkeit, Verschleißfestigkeit, Schlagfestigkeit und Formstabilität zur bevorzugten und oft einzigen Lösung für die anspruchsvollsten Sprühanlagen in der modernen industriellen Fertigung entwickelt. Sie gelten nicht mehr als gewöhnliche Verschleißteile, sondern als zentrale Funktionskomponenten, die Zykluszeit, Qualität und Kosten der gesamten Produktionslinie maßgeblich beeinflussen.

6.1.1 Schweißen und Schneiden: Wolframlegierungsdüse für Hochtemperaturspritzen

In den Bereichen Hochenergie-Strahlschweißen und -schneiden (Plasmaschweißen, Plasmaschneiden, Laser-Plasma-Hybridschweißen und Ultrahochtemperatur-Autogenschneiden) sind Wolframlegierungsdüsen, die als Lichtbogeneinschluss und Plasmaverdichtungsdüse dienen, direkt dem Lichtbogen und der reflektierten Energie bei Temperaturen von Tausenden bis Zehntausenden von Grad Celsius ausgesetzt. Während herkömmliche Kupferdüsen innerhalb von Sekunden abschmelzen und sich verformen, können Wolframlegierungsdüsen mit ihrem extrem hohen Schmelzpunkt, ihrer ausgezeichneten Oxidationsbeständigkeit und ihrer Hochtemperaturfestigkeit den Lichtbogen über Tausende von Stunden kontinuierlich und stabil einschließen. Dadurch wird ein langfristig konstantes Verdichtungsverhältnis und eine hohe Energiedichte ohne Schwankungen von Charge zu Charge in Schnittfugenbreite, Schweißnahttiefe-zu-Breite-Verhältnis und Oberflächengüte aufrechterhalten. In extremen Anwendungsszenarien wie dem Schweißen dicker Titanlegierungsplatten für die Luft- und Raumfahrt, dem Umfangsschweißen von Pipelines in Nuklearqualität und dem Schneiden von Hochgeschwindigkeitsschienen haben sich Wolframlegierungsdüsen als einziges Düsenmaterial etabliert, das die Prozesszertifizierung bestanden hat.

6.1.2 Oberflächenbeschichtung: Wolframlegierungsdüse für das Zerstäubungsformen

Oberflächenbeschichtungsverfahren (HVOF, APS und koaxiale Pulverzufuhr beim Laserauftragschweißen) stellen extrem hohe Anforderungen an Düsen: Sie müssen extrem hohen Temperaturen und hohen Flammgeschwindigkeiten mit harten Partikeln standhalten und gleichzeitig eine stabile Partikelgeschwindigkeit und Temperaturverteilung über Tausende von Stunden gewährleisten. Wolframlegierungsdüsen mit ihrem nahezu durchgehenden Wolframgerüst zur Erosionsbeständigkeit, ihrer extrem hohen Dimensionsstabilität zur Fixierung des Laval-Strömungsfeldes und ihrer ausgezeichneten Temperaturwechselbeständigkeit gegenüber Zünd- und Abschreckzyklen sind das einzige Düsenhalsmaterial, das in einem einzigen Arbeitsgang Beschichtungsdichte, Haftfestigkeit und Chargenkonsistenz auf Schmiedenniveau erreicht. In High-End-Beschichtungsanlagen, wie z. B. für Wärmedämmschichten für Triebwerkschaufeln, Instandsetzungsarbeiten, Zylinderwandverstärkungen für Automobile und Hartauftragsbeschichtungen für Öl- und Gasbohrkronen, sind Wolframlegierungsdüsen seit Langem ein unverzichtbarer Bestandteil und in der Prozessdokumentation fest verankert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1.3 Metallurgisches Gießen: Wolframlegierungsdüsen für Hochtemperaturschmelzen

In Hochtemperatur-Metallurgieprozessen wie dem Vakuumschmelzen von Verbrauchsmaterialien, dem Elektronenstrahlschmelzen, dem Plasmaschmelzen und der Pulverherstellung für Präzisionsguss mittels Zerstäubung kommen Wolframlegierungsdüsen, die als Schmelzeführung, Gaszerstäuber und Schutzgaskanäle fungieren, bei Temperaturen über 1600 °C direkt mit geschmolzenen Titanlegierungen, Nickelbasis-Superlegierungen und aktiven Metallen in Kontakt. Während herkömmliche Graphit- oder Keramikdüsen entweder von der Schmelze benetzt und erodiert oder durch den Thermoschock zersplittet werden, gewährleisten Wolframlegierungsdüsen mit ihrem extrem hohen Schmelzpunkt, ihrer extrem geringen Wärmeausdehnung und ihrer ausgezeichneten Beständigkeit gegen Schmelzerosion einen stabilen Schmelzfluss, eine extrem enge Zerstäubungspartikelgrößenverteilung und eine extrem hohe Pulverkugeligkeit. Bei der Herstellung von Titanlegierungspulver für die Luft- und Raumfahrt, Superlegierungspulver für den 3D-Druck und magnetisch zerstäubtem Pulver sind Wolframlegierungsdüsen zum absoluten Engpass geworden, der die endgültige Pulverqualität und -ausbeute bestimmt.

6.1.4 Präzisionsreinigung: Wolframlegierungsdüse für Hochdruckreinigung

Bei der Reinigung mit Reinstwasser und abrasiven Wasserstrahlen unter extrem hohem Druck (z. B. Dekontamination von Kernkraftwerken, Entfernung von Lackierungen an Offshore-Windkraftanlagen, Aufrauen von Verbundwerkstoffen in der Luft- und Raumfahrt, präzise Reinigung von Formhohlräumen) sind Düsen aus Wolframlegierungen der vierfachen Belastung durch Wasserschläge von mehreren hundert Megapascal, Millionen von Druckimpulsen, hochkorrosive Medien und harte Abrasivstoffe ausgesetzt. Während Düsen aus Saphir und Hartmetall nach einigen hundert Stunden oft Kavitation aufweisen und sich ablösen oder die Öffnungen vergrößern, behalten Düsen aus Wolframlegierungen dank ihrer extrem hohen Festigkeit, hervorragenden Kavitationsbeständigkeit und spiegelglatten Innenwand ihre Schnittfugenbreite, Oberflächenrauheit und Abtragsleistung über Tausende von Stunden auf dem ursprünglichen Niveau. In Bereichen mit extrem hohen Anforderungen an Reinheit und Stabilität, wie z. B. der Primärkreislaufreinigung in Kernkraftwerken, der Rostentfernung an den Innenwänden von LNG-Lagertanks und der CIP-Reinigung in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie, haben sich Düsen aus Wolframlegierungen als einziges Düsenmaterial etabliert, das die strengsten Vorschriften und Prozesszertifizierungen erfüllt. Die umfassende Verbreitung von Wolframlegierungsdüsen im Bereich der industriellen Fertigung hat sie von „hochwertigen Verbrauchsmaterialien“ zu „Prozesskern“ erhoben. Überall dort, wo Sprühstationen extreme Temperaturen, extreme Drücke, extremen Verschleiß und höchste Reinheit erfordern, sind Wolframlegierungsdüsen fast immer im Einsatz.

6.2 Anwendung von Wolframlegierungsdüsen im Energie- und Bergbaubereich

Die Energie- und Bergbauindustrie vereint extremste Arbeitsbedingungen, die die Menschheit je erlebt hat: Höchstdruck, hohe Temperaturen, starker Abrieb, starke Korrosion und intensive Strahlung treten gleichzeitig auf. Düsen aus Wolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer vielseitigen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistungsfähigkeit als zuverlässige Lösung für die anspruchsvollsten Sprühanwendungen in diesem Bereich etabliert.

6.2.1 Ölbohrung: Wolframlegierungsdüsen für die Hochdruck-Gesteinszerkleinerung

Bei Bohrarbeiten wie dem hydraulischen Gesteinsbrechen unter Hochdruck, der Bohrlochperforation und der Entblockierung und Produktionssteigerung von Öl- und Gasquellen sind Wolframlegierungsdüsen als zentrales Gesteinsbrechelement von Bohrmeißeln oder Perforationskanonen unmittelbar einem plötzlichen Wasserschlag von mehreren hundert Megapascal, Hochgeschwindigkeits-Abrasivströmen mit Quarzsand und Gesteinsbohrgut sowie der starken Korrosion durch säurehaltige Fracking-Flüssigkeiten ausgesetzt. Herkömmliche Hartmetalldüsen weisen nach wenigen hundert Stunden eine starke Vergrößerung der Düsenöffnung und eine Divergenz des Bohrstrahls auf, was zu einem raschen Abfall der Gesteinsbrechleistung und -richtung führt. Im Gegensatz dazu behalten Wolframlegierungsdüsen mit ihrer extrem hohen Druckfestigkeit, ihrer Beständigkeit gegen Kavitation und Ablösung sowie ihrer extrem geringen Toleranz der Düsenöffnung ihre Strahlgeschwindigkeit, ihren Fokus und ihre Gesteinsbrechleistung über Tausende von Stunden auf ihrem anfänglichen Höchstwert bei. Dies ist insbesondere in extremen Bohrszenarien wie Tiefseebohrungen, Ultratiefbohrungen und horizontalen Schieferöl- und -gasbohrungen von Bedeutung.

6.2.2 Kohlevergasung: Wolframlegierungsdüsen für Hochtemperaturreaktionen

Kohlevergasungsprozesse (Texaco, Shell, Vier-Düsen-Gegenstromvergaser) erfordern Düsen zur präzisen Zerstäubung und stabilen Verbrennung von pulverisierter Kohle, Dampf und Sauerstoff in einer extremen Umgebung mit Temperaturen über 1500 °C und hohen Konzentrationen an geschmolzenen Schlackenpartikeln und reduzierenden Gasen. Herkömmliche feuerfeste oder wassergekühlte Kupferdüsen werden entweder durch die geschmolzene Schlacke schnell erodiert oder reißen aufgrund von thermischer Spannung. Wolframlegierungsdüsen mit ihrem extrem hohen Schmelzpunkt und ihrer ausgezeichneten Beständigkeit gegen Erosion durch geschmolzene Schlacke, Temperaturschocks und Oxidation gewährleisten die Symmetrie von vier oder mehr Düsen und die langfristige Stabilität des Zerstäubungskegelwinkels. Dadurch werden die effektive Gaszusammensetzung und der Kohlenstoffumsatz des Vergasers über Zehntausende von Stunden auf höchstem Niveau gehalten. In modernen großtechnischen Kohlevergasungsanlagen mit einer jährlichen Betriebsdauer eines einzelnen Ofens von über 8.000 Stunden haben sich Düsen aus Wolframlegierung als einzige Kernbrennerkomponente etabliert, die einen „langen Zyklus, Volllastbetrieb und null ungeplante Stillstände“ ermöglicht.

6.2.3 Thermische Stromerzeugung: Wolframlegierungsdüsen zur Entschwefelung und Denitrifikation

Die Zweistoff-Zerstäubungsdüsen von Nassentschwefelungs-Sprühtürmen und SCR-Denitrifikationsanlagen sind einer stark korrosiven und abrasiven Umgebung ausgesetzt, die hohe Konzentrationen an Kalksteinschlamm, Gipspartikeln, Flugasche, SO₂, NO_x und Chloridionen enthält.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Herkömmliche Düsen aus Edelstahl und Hartmetall weisen oft bereits nach wenigen tausend Betriebsstunden starken Verschleiß, Verstopfungen oder Brüche auf, was zu erheblichen Schwankungen der Entschwefelungs- und Denitrifikationseffizienz führt. Im Gegensatz dazu gewährleisten Düsen aus Wolframlegierung (insbesondere solche mit einer nichtmagnetischen, korrosionsbeständigen Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung) mit ihren spiegelglatten Innenwänden, ihrer ausgezeichneten Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit sowie ihrer Dimensionsstabilität, dass die Zerstäubungspartikelgröße, die Sprühverteilung und die Sprühdichte über Zehntausende von Betriebsstunden auf ihren optimalen Werten bleiben. Dadurch wird sichergestellt, dass die Entschwefelungs- und Denitrifikationseffizienz die nationalen Emissionsnormen für ultraniedrige Emissionen konstant übertrifft. Bei ultrasuperkritischen Kraftwerken mit einer Leistung von 600 MW und mehr sind Düsen aus Wolframlegierungen zu einer unverzichtbaren Komponente geworden, um nahezu emissionsfreie und langfristige Anlagen zu betreiben.

6.2.4 Nutzung von Kernenergie: Wolframlegierungsdüsen für strahlungsresistente Umgebungen

Die anspruchsvollsten Strahlungsumgebungen bei der Nutzung von Kernenergie (Reinigung des Primärkreislaufs von Reaktoren, Behandlung radioaktiver Abfälle, Brennelementdekontamination, Kühlung von Isotopenproduktionszielen und präzise Strahlreinigung in Heißkammern) erfordern Düsen, die starker Neutronen- und Gammastrahlung, hochtemperierten und hochdruckempfindlichen radioaktiven Medien, starker Säure- und Laugenkorrosion sowie Erosion durch Feststoffpartikel standhalten. Herkömmliche Werkstoffe versagen innerhalb weniger Monate aufgrund von Strahlungsschwellung, Versprödung und Korrosionsdurchdringung. Düsen aus Wolframlegierung hingegen, die nahezu keine Strahlungsschwellung, eine extrem geringe Versprödungsneigung, eine ausgezeichnete Hochtemperaturfestigkeit und vollständige pH-Korrosionsbeständigkeit aufweisen, bleiben im Reaktor oder in der Heißkammer über mehrere Jahre geometrisch intakt und strahlstabil. Dies gewährleistet maximale Dekontaminationseffizienz, minimales Abfallvolumen und keine Sekundärverschmutzung. In modernen Druckwasserreaktoren, schnellen Reaktoren, Fusionsreaktor-Zielkammern und Anlagen zur Isotopenproduktion mit hohem Fluss haben sich Wolframlegierungsdüsen als die einzigen Präzisionsstrahlkomponenten etabliert, die die strengsten Zertifizierungsanforderungen für Kernkraftwerke erfüllen und langfristig in den strahlungsintensivsten Bereichen des Reaktorkerns eingesetzt werden können. Die tiefgreifende Integration von Wolframlegierungsdüsen in die Energie- und Bergbauindustrie hat sie von „hochwertigen Verbrauchsmaterialien“ zu „prozesskritischen Komponenten“ gemacht. Wolframlegierungsdüsen sind daher eine wichtige Wahl für alle Sprühanlagen, die extremen Druck-, Temperatur-, Abrieb-, Korrosions- und Strahlungsbedingungen ausgesetzt sind.

6.3 Anwendung von Wolframlegierungsdüsen in High-End-Anlagen

Die Anforderungen an Düsen in High-End-Anlagen beschränken sich nicht mehr auf die Nutzungsdauer, sondern umfassen vielmehr absolute Ausfallsicherheit, Driftfreiheit, Schadstofffreiheit und Risikofreiheit. Düsen aus Wolframlegierungen haben sich dank ihrer Maßgenauigkeit über den gesamten Temperaturbereich, ihrer nahezu theoretischen Dichte für hohe Verschleißfestigkeit, ihrer absoluten

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Reinheit und ihrer Bio-/Elektromagnetischen Verträglichkeit in anspruchsvollsten Bereichen wie Luft- und Raumfahrt, Schienenverkehr, Medizintechnik und Elektronikfertigung als Standardlösung und legitime Option etabliert.

6.3.1 Luft- und Raumfahrt: Wolframlegierungsdüsen für die Triebwerksgaseinspritzung

In den Brennkammern, Nachbrennern und Kühl- und Spülsystemen von Turbofan-/Turbowellentriebwerken dienen Düsen aus Wolframlegierung als Einlass für die Kraftstoffzerstäubung, Flammenstabilisierung, Abgaskühlung und Hochdruckspülung. Sie sind direkt den hohen Temperaturen von Verbrennungsgasen mit über 1800 °C, der Erosion durch Kohlenstoffpartikel, starken Vibrationen und schnellen Temperaturänderungen ausgesetzt. Herkömmliche Düsen aus Nickelbasis oder Edelstahl verkoken, verbrennen oder reißen nach wenigen hundert Betriebsstunden. Düsen aus Wolframlegierung hingegen gewährleisten dank ihres extrem hohen Schmelzpunktes, ihrer ausgezeichneten Oxidationsbeständigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit und Dimensionsstabilität, dass sich Zerstäubungskegelwinkel, Tropfengrößenverteilung und Kühlluftströmungsgeschwindigkeit über Zehntausende von Betriebsstunden nicht verändern. Sie haben sich als Standard-Düsenmaterial für die Brennkammern und Prüfstände gängiger Triebwerke wie der kommerziellen Triebwerke CFM56, LEAP, CJ1000A und AECC sowie vieler anderer wichtiger Modelle etabliert.

6.3.2 Schienenverkehr: Wolframlegierungsdüsen zur Kühlung von Bremssystemen

In den pneumatischen Scheibenbremssystemen von Hochgeschwindigkeitszügen (über 350 km/h) und Schwerlast-Güterzügen werden Düsen aus Wolframlegierung zur Hochdruckluftkühlung und Staubabfuhr von Bremscheiben und -belägen eingesetzt. Sie widerstehen direkt kurzzeitigen Bremsshitzebelastungen von über 800 °C, abrasiven Luftströmen mit hoher Geschwindigkeit, die Eisenpulver und Asbestfasern enthalten, sowie häufigen Start-Stopp-Belastungen. Herkömmliche Düsen verschleifen oder verstopfen nach wenigen tausend Kilometern, was zu Bremsfading und Staubablagerungen führt. Im Gegensatz dazu gewährleisten Düsen aus Wolframlegierung mit ihren spiegelglatten Innenwänden, ihrer extrem hohen Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit sowie ihrer Formstabilität eine konstante Kühlluftgeschwindigkeit und gleichmäßige Kühlung über Hunderttausende von Kilometern. Sie sind zu einer zentralen, langlebigen Komponente in den Bremssystemen der Schwerlastlokomotiven Fuxing und Harmony sowie in modernen Triebzügen wie dem ICE und TGV geworden.

6.3.3 Medizinprodukte: Wolframlegierungsdüsen für Präzisionssprühen

In hochwertigen Medizinprodukten wie Medikamenteninhalatoren, nadelfreien Insulininjektoren, ophthalmologischen Spülgeräten, zahnärztlichen Wasserstrahlgeräten und wirkstofffreisetzenden Beschichtungen für Implantate dienen Düsen aus Wolframlegierungen (insbesondere solche mit einer nichtmagnetischen Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung und medizinischer Reinheit) als entscheidendes Element, das die Partikelgröße des Medikaments, die Strahlgenauigkeit und die Biokompatibilität maßgeblich bestimmt. Sie müssen absolut nichtmagnetisch sein, keine Metallionen freisetzen, sterile

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Reinheit aufweisen und frei von extrahierbaren Substanzen sein. Herkömmliche Düsen aus Edelstahl oder Kunststoff erfüllen weder die Anforderungen an elektromagnetische Verträglichkeit noch an Biosicherheit. Düsen aus Wolframlegierungen gewährleisten dank ihrer vollständigen pH-Inertheit, der spiegelglatten Innenwand, des fehlenden Magnetismus und der strengen Biokompatibilitätssertifizierung nach ISO 10993 eine Chargenabweichung der Partikelgröße bei der Medikamentenzerstäubung im Submikrometerbereich.

6.3.4 Elektronikfertigung: Wolframlegierungsdüsen für die Chipverpackung

Beim Flip-Chip-Bonding, Wafer-Level -Packaging, Mini-/Micro-LED-Massentransfer-Sprühen, präzisen Dosieren von Underfill- Klebstoff, Plasmareinigung und Fotolack-Sprühsystemen sind Wolframlegierungsdüsen als Kernkomponenten für die Konsistenz der Lötstellen, die Genauigkeit des Klebstoffpfads und die Reinheit unerlässlich. Sie erfordern Toleranzen im Submikrometerbereich, eine Innenwandrauheit im Nanometerbereich, partikelfreie Eigenschaften und extrem hohe antistatische und elektromagnetische Verträglichkeit. Herkömmliche Saphir- oder Edelstahldüsen neigen zu Partikelbildung, elektrostatischer Adsorption oder Düsenverformung, was selbst bei geringen Verlusten im Bruchteil eines Prozents zu inakzeptablen Ausbeuteverlusten führt. Wolframlegierungsdüsen hingegen, mit ihrer theoretisch hohen Verschleißfestigkeit, der spiegelglatten und reibungsarmen Beschichtung der Innenwand, der perfekten Koaxialität und der kontrollierbaren Leitfähigkeit, behalten ihre ursprüngliche Dosier-/Sprühenauigkeit und Reinheit auch nach Hunderttausenden von Zyklen bei. Sie sind zum obligatorischen Düsenmaterial für führende globale Verpackungs- und Testlinien wie die von TSMC, Samsung, Intel und Huawei HiSilicon geworden. Die vollständige Dominanz von Wolframlegierungsdüsen in High-End-Anlagen hat die Frage nach Alternativen sinnlos gemacht. Sie sind nicht länger optional, sondern unverzichtbare Bestandteile, die direkt in Konstruktionsspezifikationen, Lieferantenlisten und Zertifizierungskatalogen aufgeführt sind. Hinter einer einzigen Wolframlegierungsdüse steht die vollständige Absicherung der empfindlichsten Komponente der gesamten High-End-Anlage.

6.4 Anwendung von Wolframlegierungsdüsen in speziellen technischen Bereichen

In anspruchsvollen technischen Anwendungen mit höchsten Anforderungen an Zuverlässigkeit, Umweltverträglichkeit und Leistungsreserven haben sich Düsen aus Wolframlegierungen längst von gewöhnlichen Industrieverbrauchsmaterialien zu strategischen Schlüsselkomponenten entwickelt, die über Erfolg oder Misserfolg eines Systems entscheiden. Ihre umfassenden, extremen Eigenschaften – „unempfindlich gegen Verbrennungen, bruchfest gegen Stöße, vibrationsfest, strahlungsunempfindlich und korrosionsbeständig“ – machen sie zu einem der wenigen Düsenmaterialien, die selbst in strengsten Konstruktionsvorgaben Anwendung finden.

6.4.1 Militärische Ausrüstung: Wolframlegierungsdüsen für spezielle Sprühsysteme

Bei der Hochenergie-Strahlreinigung, der speziellen Oberflächenbehandlung, der Dekontamination in extremen Umgebungen und der Notfallwartung von Anlagen dienen Düsen aus Wolframlegierungen als

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zentrale Aktuatoren. Sie sind extrem hohem Druck, stark abrasiven, hochgiftigen oder korrosiven Medien sowie extremen Temperaturschwankungen und starken Vibrationen ausgesetzt. Düsen aus herkömmlichen Materialien versagen oft innerhalb von Minuten bis Stunden und führen so zu Betriebsunterbrechungen. Im Gegensatz dazu gewährleisten Düsen aus Wolframlegierungen mit ihrer extrem langen Lebensdauer, der Driftfreiheit ihrer Parameter und ihrem absolut sicheren Ausfallmodus die kontinuierliche Betriebsfähigkeit der Anlagen und die Sicherheit des Personals selbst unter härtesten Bedingungen. Sie haben sich daher als zertifiziertes Düsenmaterial für viele wichtige Spezialstrahlreinigungssysteme etabliert.

6.4.2 Weltraumstart: Wolframlegierungsdüsen für Antriebssysteme

In Start- und Bahnregelungssystemen der Raumfahrt werden Düsen aus Wolframlegierungen häufig für die Düsenauskleidung von Triebwerken zur Lageregelung, für Treibstoffventile von Satelliten, für Kühldüsen von Bodentestfahrzeugen und für Hochdruck-Heliumspühdüsen eingesetzt. Diese Komponenten müssen gleichzeitig den Einflüssen von flüssigem Sauerstoff/Kerosin, flüssigem Sauerstoff/Methan und Stickstofftetroxid/unsymmetrischem Dimethylether standhalten. Hinzu kommen hochoxidierende oder korrosive Treibstoffe wie Hydrazin, kurzzeitige Brennkammertemperaturen von Tausenden von Grad Celsius und starke Vibrationen während Start und Wiedereintritt. Düsen aus Wolframlegierungen gewährleisten dank ihres extrem hohen Schmelzpunktes, ihrer ausgezeichneten Temperaturwechselbeständigkeit, ihrer nahezu null Abtragsrate und ihrer Maßgenauigkeit, dass Schubvektor und spezifischer Impuls des Triebwerks über Tausende von Sekunden konstant bleiben.

6.4.3 Chemische Notfallmaßnahmen: Wolframlegierungsdüsen für den Umgang mit korrosiven Medien

Bei der Bekämpfung von Chemieunfällen, der Entsorgung gefährlicher Stoffe sowie Neutralisierungs- und Dekontaminationsmaßnahmen in stark korrosiven Medien sind Düsen aus Wolframlegierungen (insbesondere solche mit einer nichtmagnetischen, korrosionsbeständigen Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung) Kernkomponenten mobiler oder fahrzeugmontierter Ultrahochdruck-Strahlensysteme. Diese Düsen kommen direkt mit konzentrierten Säuren, Laugen, starken Oxidationsmitteln, hochgiftigen organischen Verbindungen und biochemischen Substanzen in Kontakt. Düsen aus herkömmlichen Materialien lösen sich innerhalb von Minuten auf oder werden perforiert. Düsen aus Wolframlegierungen hingegen gewährleisten dank ihrer nahezu chemischen Inertheit über den gesamten pH-Bereich, ihrer spiegelglatten Innenwände und ihrer extrem hohen Festigkeit, dass Strahlparameter und Zerstäubungseffekte selbst in aggressivsten Medien über Stunden stabil bleiben.

6.4.4 Tiefseeerkundung: Wolframlegierungsdüsen für Hochdruckumgebungen

In Tiefseesonden, Tiefseebergbaugeräten und Hochdruck-Schneid- und Reinigungssystemen für die Tiefseeforschung müssen Düsen aus Wolframlegierung als einzige bewegliche Teile unter einem Außendruck von Tausenden von Atmosphären gleichzeitig dem hohen Druck des eindringenden Meerwassers, der abrasiven Erosion durch Meeressand und Gesteinsfragmente, der starken Korrosion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durch Chloridionen und extrem niedrigen Temperaturen standhalten. Düsen aus herkömmlichen Materialien verformen sich unter dem Tiefseedruck schnell, bilden Kavitationsblasen oder korrodieren. Düsen aus Wolframlegierung hingegen gewährleisten dank ihrer extrem hohen Druckfestigkeit, ihrer ausgezeichneten Kavitationsbeständigkeit und ihrer überlegenen Korrosionsbeständigkeit gegenüber Meerwasser, dass die Schneid- und Reinigungsleistung auch nach Tausenden von Stunden in der Tiefsee nicht nachlässt. Sie sind daher zu einem unverzichtbaren Material für Hochdruckdüsen im bemannten 10.000-Meter-Tauchboot „Striver“, in Tiefseebaugeräten und beim Aufbau von Meeresbodenbeobachtungsnetzen geworden.

6.5 Anwendungen von Wolframlegierungsdüsen in Zukunftsfeldern

Neue Technologien gehen oft mit extremen, anspruchsvollen und kompromisslosen Betriebsbedingungen für Düsen einher. Düsen aus Wolframlegierungen entwickeln sich rasant zur grundlegenden Hardware für Spitzentechnologien wie 3D-Druck, Wasserstofferzeugung, CO₂-Abscheidung und Ultrakurzpulslaser – ganz nach dem Motto: „Nur sie können mit den rasanten Entwicklungen mithalten.“ Sie sind nicht mehr nur „brauchbar“, sondern „einzige Option“.

6.5.1 3D-Druck: Wolframlegierungsdüse für Metallpulver-Jetting

Bei der gerichteten Energiedeposition (DED), dem Laser-Metall-Auftragschweißen (LMD), dem Kaltmetalltransfer (CMT) und dem aufkommenden Flüssigmetall-Jet-Druck sind Wolframlegierungsdüsen, die als koaxiale oder seitliche Pulverzuführungs Kanäle dienen, wiederholten Einwirkungen durch die Ränder von Laser-/Bogen-Fokusflecken mit Temperaturen über 1500 °C, reflektiertem Laserlicht sowie halb- und vollständig geschmolzenem Metallpulver ausgesetzt. Herkömmliche Hartmetall- oder Edelstahldüsen weisen bereits nach wenigen hundert Schichten starke Pulveranhaftungen, Knötchenbildung und eine Erweiterung des Zuführungskanals auf, was zu einer Streuung des Pulverstrahls, einem Kollaps des Auftragskanals und einem Verlust der Formgenauigkeit führt. Im Gegensatz dazu gewährleisten Düsen aus Wolframlegierungen mit ihrem extrem hohen Schmelzpunkt, der spiegelglatten, antihafbeschichteten Innenwand, der Maßgenauigkeit im Submikrometerbereich und der exzellenten Temperaturwechselbeständigkeit eine gleichbleibende Pulverfokussierung und Fließstabilität über Zehntausende von Schichten. Dadurch sind sie die einzige zulässige Option für koaxiale Pulverzuführungsdüsen in gängigen globalen 3D-Metalldruckanlagen wie GE Additive, EOS, SLM Solutions, Farsoon und BLT. Bei anspruchsvollen additiven Fertigungsverfahren, wie der Herstellung von Strukturbauteilen aus Titanlegierungen für die Luft- und Raumfahrt, der Reparatur von Gasturbinenschaufeln und dem integralen Druck von Hauptpumpenlaufrädern für Kernkraftwerke, werden Düsen aus Wolframlegierungen direkt in die Prozessspezifikationen für Luft- und Raumfahrt sowie Kernkraftwerke integriert.

6.5.2 Wasserstoffenergieindustrie: Wolframlegierungsdüsen für Brennstoffzellen

Die gesamte Wasserstoffenergiekette (von der Hochdruck-Wasserstoffspeicherdetektion über die Ultrahochdruck-Sprühkühlung an Wasserstofftankstellen und die Befeuchtung von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Brennstoffzellenstapeln bis hin zur Abgasableitung und der präzisen Elektrolytbesprühung in Redox-Flow-Batterien) stellt vier Anforderungen an Düsen: höchste Reinheit, extreme Korrosionsbeständigkeit, extreme Hochdruckbeständigkeit und die vollständige Vermeidung von Metallionenausfällungen. Wolframlegierungsdüsen (insbesondere solche mit einer nichtmagnetischen Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierung und einem extrem hohen Reinheitsgrad) erfüllen dank ihrer vollständigen pH-Wert-Inertheit, ihrer Magnetfreiheit, ihrer spiegelglatten Innenwand und der strengsten Standards für die Ionenausfällung in PEM-Brennstoffzellen (unter ppb) die beiden Anforderungen an die Befeuchtung des Brennstoffzellenstapels und die Trennung der Abgaströpfchen optimal. Dadurch wird sichergestellt, dass die Membran-Elektroden-Einheit (MEA) über Zehntausende von Stunden nicht verunreinigt wird und sich nicht zersetzt. Wolframlegierungen sind daher das einzige zertifizierte Düsenmaterial für Toyota Mirai, Honda Clarity, Hyundai NEXO und viele führende inländische Brennstoffzellenhersteller. Im 70 MPa überkritischen Wasserstoff-Leckageerkennungs- und Sprühkühlungssystem von Wasserstofftankstellen sind Wolframlegierungsdüsen aufgrund ihrer Beständigkeit gegen Wasserstoffversprödung, ihrer Beständigkeit gegen momentanen extrem hohen Druck und ihrer Dimensionsinvarianz zu einer obligatorischen Option für sicherheitsrelevante Kernkomponenten in Wasserstofftankstellen weltweit geworden.

6.5.3 Kohlenstoffabscheidung: Wolframlegierungsdüse für die Absorptionsmitteleinspritzung

In Systemen zur CO₂-Abscheidung, -Nutzung und -Speicherung (CCUS) benötigen zirkulierende Absorbertürme auf Amin-, Natriumalkali- und Calciumbasis Düsen, die langfristig hohen Temperaturen und hohen CO₂-Konzentrationen, Aminlösungen/-suspensionen mit Feststoffpartikeln, stark alkalischen Umgebungen und starken Temperaturwechseln standhalten. Düsen aus herkömmlichem Duplex-Edelstahl und Hastelloy weisen bereits nach wenigen tausend Betriebsstunden starken Abrieb, Kristallisationsverstopfungen und Spannungsrisskorrosion auf. Im Gegensatz dazu halten Düsen aus Wolframlegierung mit ihrer hervorragenden Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit, ihren spiegelglatten, schmutzabweisenden Innenwänden und ihrer Temperaturwechselbeständigkeit die optimale Größe, Verteilungsgleichmäßigkeit und Sprühdichte des Absorptionsmittels über Zehntausende von Stunden aufrecht und gewährleisten so einen konstant hohen Abscheidegrad von über 95 %. Sie haben sich daher als Standardmaterial für Absorberturmdüsen in großen nationalen Demonstrationsprojekten zur „Doppelkohlenstoffgewinnung“ (wie Huaneng Shidongkou, CR Haifeng und Datang Tuoketuo) etabliert.

6.5.4 Lasertechnologie: Wolframlegierungsdüsen für die Zusatzkühlung

In industriellen Faserlasern mit Leistungen von mehreren hundert Kilowatt bis zu Megawatt, ultraschnellen Pikosekunden-/Femtosekunden-Laserköpfen, der Lichtquellenkühlung von EUV-Lithographieanlagen und Laserfusionszündsystemen werden Wolframlegierungsdüsen, die als Überschall-Gasdüsen oder Düsen zur Kühlung mit überkritischem Helium/Stickstoff dienen, nur wenige Millimeter vom Laserfokus entfernt platziert. Sie sind reflektiertem Laserlicht, Plasmazerstäubung, kurzzeitigen Temperaturschocks von Tausenden von Grad und extrem schnellem Gasrückstrom ausgesetzt. Während herkömmliche Kupfer- oder Keramikdüsen sofort abgetragen werden oder

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zerbrechen, gewährleisten Wolframlegierungsdüsen mit ihrem extrem hohen Schmelzpunkt, ihrer ausgezeichneten Beständigkeit gegen Laserreflexionsablation, ihrer Maßgenauigkeit und ihrer kontrollierbaren Leitfähigkeit eine perfekte Stabilität der Dicke und Geschwindigkeit des Kühlgasvorhangs selbst nach Millionen von Pulsen. Dadurch werden thermische Koronaentladungen an der Laserkopflinse und Leistungsdrift vollständig eliminiert. Sie haben sich zu den zentralen Schutzdüsen für die fortschrittlichsten Lasersysteme der Welt entwickelt, darunter Trumpf, IPG Photonics, Coherent, ASML EUV-Lichtquellen und die NIF National Ignition Facility.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsdüsen

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
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/cm³), 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

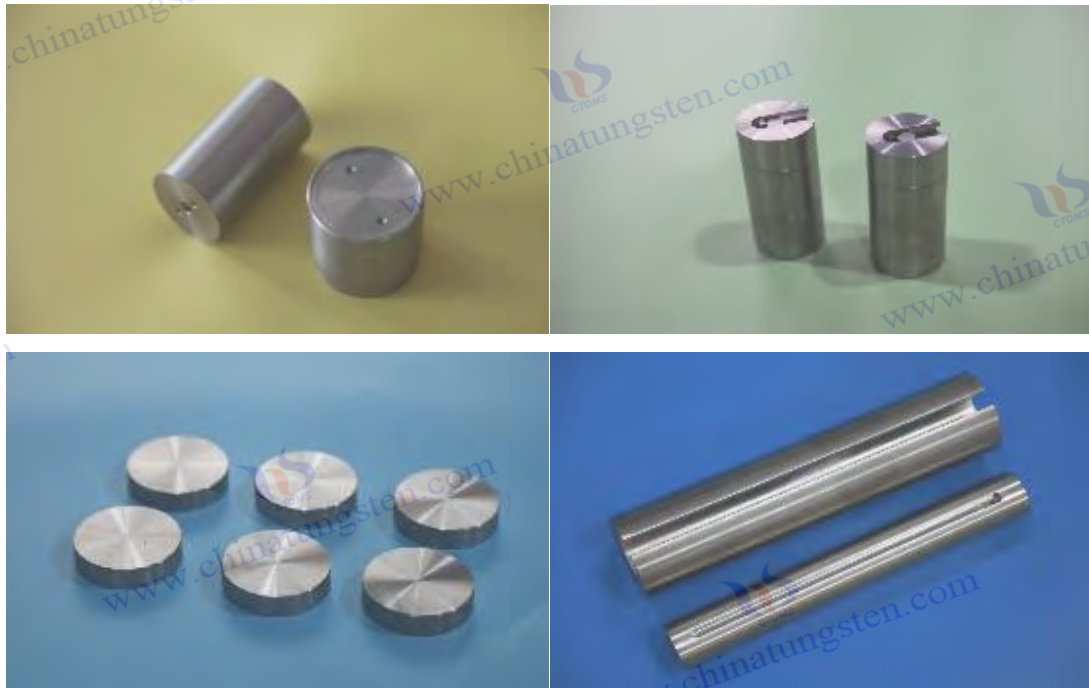
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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

Kapitel 7 Auswahl, Installation und Wartung von Wolframlegierungsdüsen

7.1 Wissenschaftliche Auswahl von Wolframlegierungsdüsen

Bei Wolframlegierungsdüsen ist die Auswahl von Parametern nie so einfach wie der Vergleich von Tabellen. Vielmehr ist eine umfassende Berechnung erforderlich, die Faktoren wie Betriebstemperatur, Druck, Materialeigenschaften, Anforderungen an die Zerstäubung, strukturelle Kompatibilität und die gesamten Lebenszykluskosten berücksichtigt.

7.1.1 Anpassung der Betriebsparameter: Anpassung der Wolframlegierungsdüse an Temperatur und Druck

Temperatur und Druck sind die absoluten Grenzwerte für die Zusammensetzung und Oberflächenbehandlung von Wolframlegierungsdüsen. Bei Betriebsbedingungen im Raum- bis mittleren Temperaturbereich und im normalen Druckbereich kann die kostengünstigste Wolfram-Nickel-Eisen-Standardzusammensetzung bevorzugt werden. Sobald die Temperatur dauerhaft 1000 °C oder die kurzzeitige Belastung 1500 °C übersteigt, ist der Wechsel zu einer Zusammensetzung mit hohem Wolframgehalt, Kobaltverstärkung oder Seltenerd-Antioxidation erforderlich. Ultrahochdruckbedingungen erfordern ein durchgehendes Wolframgerüst und eine höhere Bindemittelzähigkeit. Zur Vermeidung von Kavitation und Ablösung sind zudem eine obligatorische Borinfiltration oder Verbundbeschichtungen notwendig. Bei der Auswahl müssen ausreichende Temperatur- und Druckreserven eingeplant werden; eine Auswahl basierend auf einer gerade ausreichenden Grenze ist nicht akzeptabel. Andernfalls treten im Langzeitbetrieb unter Vollast schnell Probleme wie Düsenhalserweichung, Oxidation oder Kavitation auf, was zu Strahlverlusten und ungeplanten Ausfallzeiten führt. Der richtige Ansatz besteht darin, zunächst Temperaturfeld- und Druckpulssimulationen durchzuführen und anschließend die Formulierung auf Basis der ungünstigsten Betriebsbedingungen um eine Stufe höher anzupassen, um sicherzustellen, dass die Düse stets innerhalb ihrer Komfortzone arbeitet.

7.1.2 Materialeigenschaften Kompatibilität: Düsen aus Wolframlegierung sind mit korrosiven Medien kompatibel.

Das korrosive Medium bestimmt direkt das Überleben des Bindemittelsystems. In milden Medien wie neutralen Gasen, reinem Wasser und inerten Pulvern kommt das Wolfram-Nickel-Eisen-System problemlos zurecht. Bei starken Säuren, starken Laugen, Meerwasser, chlorhaltigen Desinfektionsmitteln oder sauerstoffhaltigen Hochtemperaturflammen ist jedoch der Einsatz eines nichtmagnetischen, korrosionsbeständigen Wolfram-Nickel-Kupfer-Systems erforderlich. Hierbei müssen der Kupfergehalt optimiert und die Oberflächenbehandlung an das jeweilige Medium angepasst werden. Hochtemperatur-Schlackeschmelzen, Plasma und Kohlenstoffpulvererosion erfordern ein Wolfram-Nickel-Eisen-System mit Seltenerd-Antioxidantien und Borierung. Sterile Medien in pharmazeutischer Qualität und Reinstwasser erfordern ein hochreines Wolfram-Nickel-Kupfer-System in medizinischer Qualität mit elektrolytischer Politur auf Hochglanz. Zahlreiche historische Vorfälle wie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

„plötzliche Düsenauflösung“, „Blasenbildung und Ablösung der Oberfläche“ sowie „Produktverunreinigung durch ausgefällte Metallionen“ gehen auf eine Inkompatibilität zwischen Medium und Bindemittelphase zurück. Vor der Systemauswahl sind Tauchtests und beschleunigte Korrosionsprüfungen unerlässlich; Entscheidungen sollten nicht auf Erfahrungswerten oder mündlichen Zusagen von Lieferanten basieren.

7.1.3 Anpassung der Leistungsanforderungen: Wolframlegierungsdüse und Strömungszerstäubung

Die erforderliche Durchflussrate und die Zerstäubungspartikelgröße bestimmen den Düsenhalsdurchmesser, den Kegelwinkel und die Länge des Expansionsbereichs. Für Schneid- und Reinigungsanwendungen mit hohen Durchflussraten und geringen Zerstäubungsanforderungen kann eine gerade oder kurze Laval-Struktur verwendet werden, die einen relativ flexiblen Düsenhalsdurchmesser ermöglicht. Für thermisches Spritzen und Brennstoffverbrennung mit mittleren Durchflussraten und hohen Zerstäubungsanforderungen muss eine klassische Laval-Düse verwendet werden, deren Düsenhalsdurchmesser und Expansionswinkel mittels CFD präzise optimiert werden. Für Anwendungen, die eine ultrafeine Zerstäubung erfordern, wie z. B. Medikamenteninhalation, Chipdosierung und EUV-Lichtquellenkühlung, ist eine Mikro-Düsenhals-, mehrstufige Strömungsstabilisierungs- und Überschall-Expansions-Verbundstruktur erforderlich, wobei die Toleranzen des Düsenhalses im Submikrometerbereich kontrolliert werden. Für Kaltspritzen und Überschallreinigung mit extrem hohen Partikelgeschwindigkeiten ist eine ultralange Laval-Struktur in Kombination mit einer Mikrotextrurierung der Innenwand und einer reibungsarmen Beschichtung notwendig. Eine einzelne Düse kann nicht gleichzeitig hohe Durchflussraten und ultrafeine Zerstäubung gewährleisten. Der Versuch, beide Anforderungen mit einer einzigen Düse zu erfüllen, führt lediglich zu unzureichendem Durchfluss, zu hohem Gegendruck oder zu grober Zerstäubung. Dies hat letztendlich eine drastische Reduzierung der Lebensdauer des Pumpensystems oder einen Verlust der Prozessqualität zur Folge. Vor der Auswahl müssen die Prioritäten klar definiert werden: Ist der Durchfluss oder die Zerstäubung von primärer Bedeutung? Anschließend sollte die Geometrie der Düsenmündung präzise auf die jeweiligen Kernanforderungen abgestimmt werden.

7.1.4 Auswahl des Strukturtyps: Wolframlegierungsdüsenstruktur und Szenenanpassung

Die Bauform bestimmt maßgeblich die Installations- und Wartungskosten. Integrierte Konstruktionen mit Gewindeanschluss eignen sich für thermisches Spritzen und Plasmaschweißen mit ausreichend Platz für die Spritzpistole und geringer Düsenwechselfrequenz. Bajonett-Schnellwechselsysteme sind speziell für Arbeitsstationen konzipiert, die einen Düsenwechsel auf zweiter Ebene erfordern, wie z. B. Wasserstrahlschneiden, Reinigen und 3D-Druck. Geschweißte oder gelötete Flanschkonstruktionen werden für fest installierte Hochtemperaturkomponenten wie Brennkammern und Vergaser eingesetzt. Integrierte Mehrfachdüsenanordnungen sind speziell für großflächiges, gleichmäßiges Sprühen in der Chipverpackung, CO₂-Abscheidungs- und -Absorptionsanlagen sowie für den LED-Massentransfer entwickelt worden. Integrierte Wasserkühlmäntel kommen bei Laserbearbeitungsköpfen mit mehreren hundert Kilowatt Leistung und Umgebungen mit hoher Wärmebelastung zum Einsatz. Die Wahl der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

falschen Bauform kann von einer zeitaufwändigen und mühsamen Installation bis hin zu vollständiger Inkompatibilität führen. In der Vergangenheit traten die häufigsten Fehler bei der Auswahl auf, wenn die Leistungsparameter perfekt übereinstimmten, die Bauform jedoch nicht passte. Bei der Modellauswahl ist es unerlässlich, vor der Entscheidung für die passende Ausführung zunächst die Schnittstelle des Pistolenkörpers, den Einbauraum, die Düsenwechselfrequenz und die Notwendigkeit einer Wasserkühlung zu prüfen. Die Leistung darf niemals unter Vernachlässigung der physikalischen Kompatibilität betrachtet werden.

7.1.5 Vermeidung häufiger Auswahlfehler: Analyse häufiger Probleme bei der Auswahl von Wolframlegierungsdüsen

Die fünf häufigsten Fehler bei der Düsenwahl müssen unbedingt vermieden werden: Erstens: Wer sich ausschließlich auf den niedrigsten Stückpreis konzentriert und die Gesamtkosten über die gesamte Lebensdauer außer Acht lässt, kauft billige Düsen mit kurzer Lebensdauer, die dutzende Male im Jahr ausgetauscht werden müssen, was letztendlich die höchsten Gesamtkosten verursacht. Zweitens: Wer Standardformulierungen unter extremen Betriebsbedingungen einsetzt, in der Annahme, dadurch Auswahlkosten zu sparen, zahlt den hohen Preis von Produktionsausfällen und Qualitätsmängeln. Drittens: Wer blindlings den kleinsten Düsenhalsdurchmesser wählt, riskiert einen stark unzureichenden Durchfluss und einen stark erhöhten Gegendruck, was die Lebensdauer von Pumpen und Rohrleitungen erheblich verkürzt. Viertens: Wer Anzugsmoment, Dichtungsmethoden und Koaxialitätsanforderungen ignoriert, macht selbst die beste Düse bei falscher Installation nutzlos, was zu Strahlabweichungen und vorzeitigem Verschleiß der Spritzpistole führt. Fünftens: Wer große Mengen neuer Medien oder Verfahren ohne vorherige Kleinserienprüfung erwirbt, riskiert Verluste in Höhe von Hunderttausenden von Euro durch Ausschuss und Produktionsausfälle, falls die Formulierung oder Oberflächenbehandlung inkompatibel ist. Der richtige Ansatz besteht darin, zunächst 3–5 Düsen für eine beschleunigte Lebensdauerprüfung über 2000 Stunden zu erwerben. So lassen sich optimale Temperatur, Druck, Medium, Durchfluss, Zerstäubung und Installationskompatibilität sicherstellen, bevor die Produktion ausgeweitet wird. Außerdem muss gewährleistet sein, dass dieselbe Pulvercharge und dasselbe Verfahren verwendet werden. Diese Methode mag zwar langsam erscheinen, ist aber tatsächlich die schnellste, wirtschaftlichste und sicherste. Die wissenschaftliche Auswahl von Wolframlegierungsdüsen ist im Wesentlichen ein systematisches Projekt, das „teuer“ in „wertvoll“ verwandelt. Nur durch ein umfassendes Verständnis der Betriebsbedingungen und die Vermeidung häufiger Fehler kann eine Düse ihre theoretische Lebensdauer erreichen.

7.2 Installation und Justierung von Wolframlegierungsdüsen: Wichtige Punkte zur Sicherstellung der Präzision

Bei einer Düse aus Wolframlegierung halbiert sich die tatsächliche Leistung sofort oder sie wird sogar unbrauchbar, wenn während der Installation eine Koaxialitätsabweichung von 0,01 mm oder ein Drehmomentfehler von 5 Nm auftritt. Führende Anwender haben Installation und Inbetriebnahme daher längst als „zweiten Fertigungsschritt“ mit denselben strengen Anforderungen wie die Düsenherstellung etabliert, und jede Nachlässigkeit wird als schwerwiegender Qualitätsmangel betrachtet.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2.1 Vorbereitung vor der Installation: Prüfung der Wolframlegierungsdüse und Kompatibilität des Zubehörs

Nach dem Öffnen des Kartons befolgen Sie sofort die „Fünf-Punkte-Regel: Drei-Punkte-Prüfung: Prüfen Sie, ob der Vakuumbeutel unbeschädigt ist und ob sich das Trockenmittel verfärbt hat; prüfen Sie, ob die Düsenoberfläche Unebenheiten, Absplitterungen oder abblätternde Beschichtungen aufweist; prüfen Sie, ob die Lasermarkierung und der QR-Code deutlich lesbar sind; prüfen Sie, ob der beiliegende Materialbericht, der Maßprüfbericht und die Leistungskurve des Strahls vollständig sind; und prüfen Sie, ob alle speziellen Zubehöerteile wie Dichtungsringe, Führungshülsen und Drehmomentschlüssel vorhanden sind. Anschließend werden die Düsen und alle Kontaktteile unter Verwendung puderfreier Nitrilhandschuhe ein zweites Mal mit wasserfreiem Ethanol und Ultraschall gereinigt. Nach dem Trocknen mit Stickstoff werden sie sofort vorübergehend unter Vakuum gelagert. Das Dichtungsringmaterial muss je nach Medium erneut geprüft werden (Fluorkautschuk für normale Bedingungen, Perfluorether für hohe Temperaturen und Kalrez für Reinraumumgebungen).

7.2.2 Spezifikationen für die Kerninstallation: Positionierungs- und Dichtungstechnologie für Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen müssen die Prinzipien „dreifache Vermeidung von hartem Kontakt, zweistufiges Vorspannen und dreistufiges Drehmoment einstellen“ strikt einhalten. Die Düsenstirnfläche, die konische Oberfläche und der Außenkreis dürfen nicht in direkten harten Kontakt mit dem Pistolenkörpermetall kommen. Hochpräzise Führungshülsen aus PEEK oder Invar sind zur Isolation zu verwenden, um Stöße im Mikrometerbereich und Spannungskonzentrationen zu vermeiden.

Die Gewindeverbindung wird in drei Schritten hergestellt: Zuerst wird sie von Hand festgezogen, bis sie spielfrei sitzt; dann wird sie mit einem kalibrierten Drehmomentschlüssel auf 80 % des Zielwertes angezogen und fünf Minuten ruhen gelassen, um Spannungen abzubauen; schließlich wird sie auf 100 % des Zieldrehmoments angezogen, wobei der Fehler innerhalb von ± 5 % gehalten werden muss.

Bei Schnellwechsel-Bajonettkonstruktionen muss ein deutliches doppeltes „Klick“-Geräusch zu hören sein, und die Verriegelungstiefe muss mit Hilfe einer speziellen Lehre überprüft werden. Die Dichtungsmethoden werden nach Druck klassifiziert: Bei Normaldruck werden O-Ringe und Anti-Extrusionsringe verwendet; bei Hochdruck Metall-C-Ringe oder Linsendichtungen; bei Ultrahochdruck Metall- Δ -Ringe mit doppelten O-Ringen als zusätzliche Sicherung. Die Verwendung von PTFE-Band oder flüssigem Dichtmittel ist strengstens verboten, um zu verhindern, dass Fragmente in den Hals gelangen und eine sofortige Verstopfung verursachen.

7.2.3 Kontrolle der Installationsgenauigkeit: Kalibrierung der Koaxialität und Rechtwinkligkeit von Wolframlegierungsdüsen

Koaxialität und Rechtwinkligkeit sind entscheidend für die Richtungsabhängigkeit des Strahls; Abweichungen beim Schneiden oder ungleichmäßige Beschichtung verstärken diese Faktoren.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wasserstrahl- und Reinigungspistole: Verwenden Sie eine Messuhr mit Hebel (0,001 mm) und V-förmigem Referenzblock, um den Rundlauf des Düsenaußenkreises relativ zur Pistolenkörperachse und die Rechtwinkligkeit der Stirnfläche zu messen. Die zulässigen Grenzwerte sind: Rundlauf $\leq 0,01$ mm und Rechtwinkligkeit $\leq 0,008$ mm. Koaxiale Pulverzuführungspistole für thermisches Spritzen und Laserauftragschweißen: Verwenden Sie einen Lasertracker oder ein hochpräzises PSD-Punktanalysesystem, um die Übereinstimmung des Pulverstrahl-/Luftschleierfokus mit dem Laserfokus ($\leq 30 \mu\text{m}$) zu messen. Mehrfachdüsenanordnung: Verwenden Sie ein optisches Bildmessgerät oder ein Weißlichtinterferometer, um jede Öffnung abzutasten und sicherzustellen, dass die Parallelität aller Düsenachsen relativ zur Montagefläche $\leq 0,01^\circ$ beträgt.

Jegliche Abweichung von der Toleranz muss sofort behoben und die Position korrigiert werden; „gut genug“ ist nicht zulässig. Nach der Kalibrierung muss die Verbindungsstelle zwischen Gewinde und Pistolenkörper mit einem Anti-Lockerungsmarker deutlich markiert werden, um ein Lösen während des Betriebs zu verhindern.

7.2.4 Kern-Debugging-Prozess: Kalibrierung von Durchfluss und Druck der Wolframlegierungsdüse

Die Inbetriebnahme erfolgt strikt nach dem dreistufigen Verfahren „Einlauf bei niedrigem Druck, Kalibrierung bei mittlerem Druck und Einstellung bei hohem Druck“. In der ersten Stufe wird das System mindestens eine halbe Stunde lang mit 30–40 % des Nenndrucks betrieben. Dabei wird besonders auf ungewöhnliche Pfeifgeräusche geachtet, auf Mikroleckagen beobachtet und mittels Wärmebildkamera der gleichmäßige Temperaturanstieg überprüft. In der zweiten Stufe wird der Druck auf 70 % des Nenndrucks erhöht und die tatsächliche Durchflusskurve mit einem metrologisch zertifizierten Standard-Durchflussmesser und Druckmessumformer gemessen. Diese Kurve wird mit den Werksdaten der Düse verglichen. Übersteigt die Abweichung 3 %, muss das System gestoppt und neu installiert werden. In der dritten Stufe wird das System mindestens eine Stunde lang stabil mit 100 % des Nenndrucks betrieben. Gleichzeitig wird mittels Hochgeschwindigkeitsfotografie oder Laser-Sheet-Imaging der Divergenzwinkel des Strahls erfasst, eine Wärmebildkamera wird zur Überwachung des Temperaturanstiegs an der Außenwand eingesetzt und ein Schallpegelmesser wird zur Überwachung des Geräuschspektrums verwendet, um sicherzustellen, dass alle Parameter innerhalb des optimalen Bereichs der Werkskurve liegen.

7.2.5 Installation, Inbetriebnahme und Abnahme: Leistungsprüfungsstandards für Wolframlegierungsdüsen

Der abschließende Abnahmeprozess folgt den eisernen Regeln der „sechs Muss-Kriterien und sechs Nulltoleranzen“: Das System muss einen kontinuierlichen, stabilen Volllastbetrieb für mindestens zwei Stunden gewährleisten; die gemessene Durchflussrate, die zerstäubte Partikelgröße (oder Spaltbreite) und der Divergenzwinkel müssen alle den Normen entsprechen; die Wärmebildgebung darf keine lokalen Hotspots, sichtbare Leckagen, ungewöhnliche Vibrationen oder Pfeifgeräusche zeigen; optische Verfahren müssen erneut überprüfen, ob Koaxialität, Rechtwinkligkeit und Fokusüberlappung noch

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

innerhalb der zulässigen Bereiche liegen; die Gleichmäßigkeit der Strahl-/Pulverabdeckung und die Chargenkonsistenz müssen überprüft werden; und das „Düseninstallations-, Inbetriebnahme- und Abnahmeprotokoll“ muss vom Bediener, Verfahrenstechniker und Qualitätsmanager gemeinsam unterzeichnet werden.

Der sorgfältige Installations- und Inbetriebnahmeprozess gewährleistet, dass Düsen aus Wolframlegierung tatsächlich von der „theoretischen Perfektion“ zur „Perfektion vor Ort“ gelangen. Die endgültige Leistung einer Düse wird zu 70 % durch die Fertigung und zu 30 % durch Installation und Inbetriebnahme bestimmt.

7.3 Tägliche Wartung von Wolframlegierungsdüsen

Düsen aus Wolframlegierungen gelten als nahezu unzerstörbar, wobei „nahezu“ nicht „völlig unzerstörbar“ bedeutet. Selbst unter extremen Betriebsbedingungen können geringfügige Verschlechterungen der Düsenhalsgeometrie und des Oberflächenzustands zu Prozessstörungen führen. Wahre Langlebigkeit wird nicht durch das Material selbst erreicht, sondern durch systematische, wissenschaftliche und beinahe obsessive Wartung, die den Verschleiß unterhalb der theoretischen Grenzen hält.

7.3.1 Wichtige Punkte für die regelmäßige Inspektion: Verschleiß- und Korrosionserkennung an Düsen aus Wolframlegierung

Regelmäßige Inspektionen sind entscheidend für die Lebensdauer von Wolframlegierungsdüsen. Diese müssen täglich durchgeführt werden (Sichtprüfung, wöchentliche Halsmessung, monatliche Vollmaßprüfung, vierteljährliche metallografische Bruchanalyse). Die täglichen Inspektionen nach Schichtende sollten eine Sichtprüfung mit einer 10-fachen Lupe auf Absplitterungen am Hals, Beschädigungen der Stirnfläche und ungewöhnliche Haftung an der Innenwand umfassen. Wöchentlich sind Halsdurchmesser und Rundheit mit einem optischen Halsmessgerät oder Endoskop zu messen; jede Vergrößerung ist zu dokumentieren und mit historischen Messwerten zu vergleichen. Monatlich nach Anlagenstillstand ist eine Vollmaßprüfung des Konuswinkels, des Expansionsprofils und der Koaxialität mit einer Koordinatenmessmaschine oder einem Weißlichtinterferometer durchzuführen; jegliche Abweichungen sind umgehend zu melden. Vierteljährlich ist ein zufällig ausgewählter Düsenabschnitt metallografisch und rasterelektronenmikroskopisch zu untersuchen, um Mikrorisse im Wolframgerüst, selektive Korrosion der Bindemittelphase und Ablösung der Oberflächenbeschichtung festzustellen.

7.3.2 Reinigungs- und Wartungsstandards: Reinigung von Wolframlegierungsdüsen bei Verstopfung und Oberflächenpflege

Wolframlegierungsdüsen sind besonders anfällig für Verschmutzungen, gefolgt von Abrieb. Reinigung und Wartung folgen der eisernen Regel: „Vorbeugen ist besser als Heilen, und niemals stark schrubben.“ Spülen Sie die Düse unmittelbar nach dem täglichen Abschalten mit trockenem Stickstoff unter hohem Druck in beide Richtungen, um Pulver-, Flüssigkeits- und Kristallreste gründlich zu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

entfernen. Führen Sie einmal wöchentlich eine dreistufige Zirkulationsreinigung mit Ultraschall, Vakuumreinigung mit Reinstwasser und Isopropanol durch, um lösliche Salze und organische Stoffe vollständig zu entfernen. Bei leichten Verklebungen oder Ablagerungen wischen Sie die Düse zunächst vorsichtig mit einer weichen Nylonbürste und einem neutralen Reinigungsmittel ab. Hartnäckige Rückstände entfernen Sie anschließend mit Plasmareinigung oder CO₂-Schneespray. Verwenden Sie niemals Stahlwolle, harte Schaber oder starke Säuren oder Laugen direkt an der Düse. Wenn die Oberflächenbeschichtung lokale Kratzer oder leichte Abplatzungen aufweist, stellen Sie die Verwendung der Düse sofort ein und senden Sie sie zur Reparatur an den Hersteller zurück. Beschädigte Düsen dürfen nicht betrieben werden. Alle Reinigungswerkzeuge, Lösungsmittel und Spülgase müssen jeweils einer bestimmten Düse zugeordnet werden, um Kreuzkontaminationen zu vermeiden. Durch sachgemäße Reinigung und Wartung lässt sich die Wahrscheinlichkeit von Verstopfungen und Oberflächenbeschädigungen nahezu auf null reduzieren.

7.3.3 Bestimmung des Wartungszyklus: Wartungsplan für Wolframlegierungsdüsen basierend auf den Betriebsbedingungen

Die Wartungszyklen werden nicht willkürlich festgelegt, sondern nach der Intensität der Betriebsbedingungen gestaffelt. Bei milden Bedingungen (Reinwasserreinigung, Niedertemperaturspritzen, keine korrosiven Medien) sind eine tägliche Sichtprüfung, eine wöchentliche Halsdickenmessung und eine monatliche Vollmaßprüfung erforderlich. Bei mittleren Bedingungen (z. B. Abrasivwasserstrahlschneiden, konventionelles thermisches Spritzen und Neutralschlamm-spritzen) sind tägliches Spülen, eine tägliche Schnellprüfung der Halsdicke, eine wöchentliche Ultraschallreinigung und eine monatliche metallografische Probenahme notwendig. Extreme Bedingungen (Hochtemperaturplasma, schlackehaltige Vergasungsöfen und stark korrosive Absorptionstürme) erfordern zweimal tägliches Spülen, eine Halsdickenmessung pro Schicht, tägliche Ultraschallreinigung, eine wöchentliche metallografische Querschnittsuntersuchung und eine monatliche obligatorische, rotierende Stillstandswartung. Verschiedene Arbeitsstationen derselben Produktionslinie können unterschiedliche Zyklen haben, diese müssen jedoch in den Arbeitsanweisungen dokumentiert und eingehalten werden. Führende Anwender haben Wartungszyklen vollständig in die Inspektionspläne für die Anlagen, die Stillstandsplanung und die Ersatzteilbestände integriert und so einen positiven Kreislauf geschaffen, in dem gilt: „Je schärfer die Betriebsbedingungen, desto häufiger die Wartung und desto länger die Lebensdauer.“

7.3.4 Verwaltung von Verbrauchsmaterialien: Ersatzteil- und Lagerhaltungsstrategie für Düsenbauteile aus Wolframlegierung

Düsen aus Wolframlegierungen selbst weisen eine extrem lange Lebensdauer auf, jedoch erreichen periphere Verschleißteile wie Dichtungsringe, Führungshülsen, Schnellwechselbajonette und integrierte Wasserkühlmäntel oft zuerst das Ende ihrer Lebensdauer. Die Verwaltung der Verschleißteile folgt dem Prinzip „drei feste und drei nicht feste“: festes Personal (zuständiges Personal), fester Lagerort (spezielle Lagerung im Reinraum) und feste Menge (monatlicher Verbrauch + Sicherheitsbestand); keine Vermischung, keine Engpässe und kein Verfallsdatum. Dichtungsringe werden je nach tatsächlicher

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nutzungsdauer und Korrosionsgrad des Mediums zwangsweise ausgetauscht; Führungshülsen werden bei jedem Verschleiß von 0,01 mm sofort ersetzt; und Schnellwechselbajonette werden nach jeweils tausend Ein- und Ausbauten zwangsweise verschrottet. Wasserkühlmäntel mit Ablagerungen über einer bestimmten Dicke müssen säuregewaschen oder ersetzt werden. Die Lagerstrategie ist zweistufig: „Langfristiger Lagerbestand gängiger Spezifikationen und schnelle Reaktion auf nicht benötigte Spezifikationen“. Standard-Düsenhalsdurchmesser und -strukturen werden für mehr als einen Monat Verbrauch auf Lager gehalten. Spezielle, kundenspezifische Ausführungen werden dank Vereinbarungen mit Lieferanten innerhalb von 48 Stunden geliefert. Parallel dazu ist ein vierstufiges Rotationssystem etabliert: eine Düse außer Betrieb, eine Düse in Betrieb, eine Düse in Reinigung und eine als Ersatzdüse. So ist jederzeit eine hundertprozentige Düsenverfügbarkeit gewährleistet. Führende Anwender haben Düsen aus Wolframlegierung sogar in ihr System zur Verwaltung kritischer Ersatzteile aufgenommen. Dadurch werden automatisch Beschaffungsmaßnahmen und Benachrichtigungen an die Führungsebene ausgelöst, sobald der Lagerbestand unter den Sicherheitsgrenzwert fällt.

Die Verwendung von Wolframlegierungsdüsen ist im Wesentlichen der letzte Schritt, um die optimale Leistungsfähigkeit des Materials in langfristige Prozessstabilität umzusetzen. Nur durch sorgfältige Inspektion, gründliche Reinigung, wissenschaftlich geplante Wartung und die Sicherstellung der Verfügbarkeit von Ersatzteilen kann eine Düse ihre volle, stabile und maximale Lebensdauer erreichen. Bei ordnungsgemäßer Wartung sind Wolframlegierungsdüsen keine Verbrauchsmaterialien, sondern vielmehr die zuverlässigsten Komponenten in der Produktionslinie.

7.4 Fehlersuche bei Wolframlegierungsdüsen

Die Fehlersuche ist die letzte Verteidigungslinie im gesamten Lebenszyklusmanagement von Wolframlegierungsdüsen und zugleich eine Schlüsselkompetenz, die die Professionalität eines Anwenders am besten widerspiegelt. Nur durch die Beherrschung des gesamten geschlossenen Regelkreises von der Diagnose über die Reparatur bis hin zur Prävention lässt sich ein Fehler von einer Katastrophe in ein kontrollierbares Ereignis verwandeln, wodurch Ausfallzeiten und Sicherheitsrisiken minimiert werden. Obwohl Wolframlegierungsdüsen eine extrem lange Lebensdauer aufweisen, arbeiten sie unter rauen Bedingungen, und jede noch so kleine Anomalie erfordert ein sofortiges Eingreifen.

7.4.1 Häufige Fehlerdiagnose: Analyse der Ursachen für anormale Durchflussraten in Wolframlegierungsdüsen

Eine anormale Durchflussrate ist das häufigste und am einfachsten zu erkennende Fehlersignal bei Wolframlegierungsdüsen. Oft handelt es sich nicht um ein einzelnes Problem, sondern um ein komplexes Zusammenspiel mehrerer Ursachen und Wirkungen, das sich üblicherweise durch einen plötzlichen Durchflussabfall, einen allmählichen Rückgang, instabile Schwankungen oder unerwartete Spitzenwerte äußert. Die Diagnose muss schrittweise erfolgen, indem die verschiedenen Ebenen des Problems – vom Phänomen über den Mechanismus bis zur eigentlichen Ursache – analysiert werden, um sicherzustellen, dass keine versteckten Gefahren übersehen werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die häufigste Ursache für einen plötzlichen Durchflussabfall ist eine lokale Verstopfung im Düseneinlauf oder Strömungskanal. Beim Abrasivwasserstrahlschneiden oder pulverförmigen Laserauftragschweißen agglomerieren harte Partikel oder Pulver am Düseneinlauf oder im Erweiterungsbereich und bilden einen „Eisbergeffekt“ – an der Oberfläche nicht sichtbar, aber mit einer starken inneren Verstopfung. Die Diagnose beginnt mit einer Endoskopie oder einer Hochdruck-Stickstoffspülung, um den Düseneinlauf auf Fremdkörper zu überprüfen. Werden keine gefunden, wird mittels Laserscan gemessen, ob sich der Düseneinlaufdurchmesser leicht vergrößert hat (ein frühes Anzeichen von Kavitation). Anschließend wird der vorgelagerte Filter auf Verstopfungen oder Schwankungen des Pumpendrucks geprüft. Ein allmählicher Durchflussabfall ist in der Regel auf eine Verschlechterung der Innenwandrauheit oder eine langsame Düseneinlauferweiterung zurückzuführen. Die Verschlechterung der Rauheit wird oft durch Oberflächenoxidation oder Mikroadhäsion verursacht. Zur Diagnose werden die Veränderungen der Innenwandstruktur mit einem Weißlichtinterferometer abgetastet. Bei der Erweiterung wird ein Präzisions-Pneumatikmessgerät verwendet, um den Düseneinlaufdurchmesser und die Rundheit erneut zu messen. Instabile Strömung entsteht häufig durch Druckpulsationen im Zulauf oder thermische Verformung der Düse. Zur Diagnose wird die Gegendruckkurve mit einem Hochfrequenz-Druckmessumformer aufgezeichnet und die Gleichmäßigkeit des Temperaturanstiegs an der Außenwand mit einer Wärmebildkamera überprüft. Ein unerwarteter Temperaturanstieg wird oft durch einen Riss im Düsenhals oder eine Ablösung der Beschichtung verursacht. Die Diagnose erfordert ein sofortiges Abschalten und die Untersuchung auf innere Risse mittels industrieller Computertomographie oder Ultraschallprüfung.

Die Analyse mehrerer Ursachen ist für die Diagnose entscheidend. Beispielsweise deutet ein verringerter Durchfluss in Verbindung mit erhöhtem Geräuschpegel in der Regel auf den Kollaps von Kavitationsblasen hin, der zu Lochfraß im Düsenhals führt. Durchflussschwankungen in Verbindung mit einem ungewöhnlichen Temperaturanstieg lassen auf eine Verstopfung des Kühlkanals oder einen Ausfall der Wasserkühlung schließen. Eine Durchflussschwächung in Verbindung mit einer Strahldivergenz deutet auf geringfügige Änderungen des Konuswinkels im Expansionsbereich hin. Die Diagnoseinstrumente müssen Endoskope, Weißlichtinterferometer, pneumatische Messgeräte, Wärmebildkameras, Hochfrequenz-Druckmessgeräte, industrielle Computertomographen, Ultraschall-Fehlerprüfung und rasterelektronenmikroskopische metallografische Analysen umfassen und einen geschlossenen Kreislauf bilden – von außen nach innen, vom Makro- zum Mikrobereich. Jede Anomalie muss fotografiert, archiviert, chargenweise zurückverfolgt und der Lieferant zur gemeinsamen Analyse benachrichtigt werden. Nur durch die gründliche Analyse von Durchflussanomalien – von einem „Problem“ hin zu einem „vermeidbaren und kontrollierbaren Mechanismus“ – lässt sich die Düsenlebensdauer von „Tausenden von Stunden“ auf „Zehntausende von Stunden“ verlängern.

7.4.2 Fehlersuche: Reparaturlösung für Verschleiß und Leckagen an Wolframlegierungsdüsen

Verschleiß und Leckage sind die beiden hartnäckigsten Hauptursachen für Ausfälle von Wolframlegierungsdüsen. Verschleiß führt zu einer Vergrößerung des Düsenhalses und Strahldivergenz, während Leckage die Durchflussregelung beeinträchtigt und Sicherheitsrisiken birgt. Die Lösung muss drei Aspekte berücksichtigen: „Schnelle Schadensbegrenzung + gründliche Instandsetzung + präventive

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Modernisierung“, um sicherzustellen, dass die Düsenleistung nach der Reparatur vollständig wiederhergestellt wird oder sogar den ursprünglichen Zustand übertrifft.

Zur Verschleißreparatur wird endoskopisches Laserscanning eingesetzt, um die Verschleißfläche präzise zu lokalisieren und zu quantifizieren. Ein Eingriff ist erforderlich, wenn der Düsenhalsdurchmesser um mehr als 0,01 mm vergrößert ist. Bei geringfügigem Verschleiß kommen Fließpolieren und elektrolytisches Polieren zum Einsatz: Die Düse wird in eine spezielle Polierlösung getaucht, und unter Hochfrequenzstrom wird eine geringe Materialmenge von der Innenwand abgetragen. Der Düsenhalsdurchmesser wird präzise auf sein ursprüngliches Maß gebracht, und die Oberflächenrauheit wird auf Spiegelglanz gebracht. Bei mäßigem Verschleiß ist eine Reparatur mittels lasergestütztem Umschmelzen speziell für Wolframlegierungen erforderlich: Die Verschleißschicht wird mit einem gepulsten Laser aufgeschmolzen und anschließend verfestigt, wodurch eine dichte, porenfreie neue Oberfläche entsteht. Härte und Verschleißfestigkeit sind nach der Reparatur sogar höher als im Originalzustand. Bei starkem Verschleiß wird die Düse direkt ausgetauscht. Ein Abschnitt der alten Düse wird jedoch für metallografische Analysen aufbewahrt, um die Ursache des beschleunigten Verschleißes zu ermitteln (z. B. zu hartes Schleifmittel, falscher Winkel oder unzureichende Kühlung). Alle reparierten Düsen müssen vor der Wiederverwendung auf ihre ursprünglichen Abmessungen kalibriert und auf Strahlfluss geprüft werden.

Die Reparatur von Leckagen lässt sich in zwei Hauptkategorien unterteilen: Dichtungsleckagen und Gehäuseleckagen. Dichtungsleckagen entstehen häufig durch alternde O-Ringe oder ein unzureichendes Anzugsmoment. Die Lösung besteht darin, die O-Ringe durch höherwertige (z. B. FFKM- Perfluorether) zu ersetzen und sie mithilfe eines Drehmomentkalibrators wieder einzubauen, wobei ein Drehmomentfehler von $\leq 5\%$ sichergestellt werden muss. Gehäuseleckagen entstehen typischerweise durch Mikrorisse oder miteinander verbundene Kavitationsgruben. Die Reparatur umfasst das Füllen der Risse mit Wolframlegierungslot, gefolgt vom Oberflächenaufschmelzen: Zuerst wird hochreiner Wolframdraht oder ein spezielles Lötmetall verwendet, um die Risse zu füllen. Anschließend wird durch Laseraufschmelzen die reparierte Stelle nahtlos mit dem Substrat verbunden. Nach der Reparatur ist eine doppelte Überprüfung mittels Helium-Massenspektrometer-Lecksuchgerät und Hochdruck-Halteprüfung erforderlich. Erst wenn absolute Dichtheit erreicht ist, kann die Reparatur freigegeben werden.

Das oberste Prinzip zur Behebung von Kernfehlern lautet: „Einmal beheben, eine Fehlerklasse ausmerzen“. Jeder Verschleiß- oder Leckagefall muss einen 8D-Bericht und eine geschlossene Prozessoptimierung auslösen. Dabei werden die Ursachen analysiert (z. B. ungleichmäßige Schleifpartikelgröße, die zu abnormaler Erosion führt, oder unzureichender Kühlstrom, der lokale Kavitation verursacht), Präventionsmaßnahmen optimiert (z. B. durch vorgelagerte Filter oder verbesserte Wasserkühlung) und Düsen verbessert (z. B. durch Verdickung der Düsenhalswand oder Umstellung auf DLC-Beschichtung). Nur durch die vollständige Transformation von „passiver Fehlerbehebung“ hin zu „proaktiver Optimierung“ kann die Lebensdauer von Wolframlegierungsdüsen von „Tausenden von Stunden“ auf den neuen Industriestandard von „Zehntausenden von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Stunden“ gesteigert werden. Die ausgereifte Kernfehlerbehebung gibt den Anwendern zudem absolutes Vertrauen und ermöglicht ihnen, Fehler auch im Ernstfall gelassen zu beheben.

7.4.3 Umgang mit extremen Fehlern: Maßnahmen zur Behandlung von Rissen und Verformungen an Wolframlegierungsdüsen

Rissbildung und Verformung stellen die extremsten und gefährlichsten Ausfallarten von Wolframlegierungsdüsen dar. Rissbildung führt häufig zu plötzlichem Kontrollverlust des Strahls und Hochdruckleckagen, während Verformung zum Zusammenbruch der Düsengeometrie und zur vollständigen Unwirksamkeit der Prozessparameter führt. Die Reaktion muss dem eisernen Prinzip „Sicherheit zuerst, Schadensminimierung zweitens, Reparatur drittens und grundlegende Behebung viertens“ folgen. Jede Verzögerung kann zu Anlagenschäden und Personenschäden führen.

Bei Rissbildung ist der erste Schritt, die Maschine sofort abzuschalten, den betroffenen Bereich abzusperren und das Medium drucklos zu machen und zu entlüften, um jegliche Hochdruckgefahren vor Ort auszuschließen. Anschließend werden mithilfe eines Endoskops und eines industriellen Computertomographen (CT) Position, Tiefe und Ausbreitungsweg des Risses lokalisiert. Der Risstyp (thermischer Ermüdungsris, Kavitationsris, Wasserstoffversprödungsris) wird schnell durch metallografische Analyse der Bruchfläche bestimmt. Kleinere Oberflächenrisse können vor Ort mittels Laserschmelzen repariert werden: Ein gepulster Laser schmilzt den gerissenen Bereich auf und verfestigt ihn anschließend zu einer neuen, porenfreien Oberfläche, wodurch die ursprüngliche Festigkeit wiederhergestellt wird. Mittelgroße Risse erfordern die Rücksendung an das Werk zur Reparatur durch Hartlöten und Heißisostatisches Pressen (HIP). Zunächst wird der Riss mit einem speziellen Wolframdraht gefüllt, anschließend werden unter hohem Druck und hoher Temperatur innere Spannungen abgebaut. Starke Risse werden verschrottet, jedoch werden Abschnitte für eine detaillierte FMEA-Analyse aufbewahrt. Bei Verformungen liegt der Fokus auf der Wiederherstellung der Dimensionen: Geringfügige Verformungen werden mithilfe von Präzisionsvorrichtungen und Niedrigtemperaturglühen korrigiert; mäßige Verformungen erfordern eine HIP-Umformung; und starke Verformungen werden ebenfalls verschrottet und auf ihren ursprünglichen Zustand zurückgeführt.

Der wahre Wert extremer Ausfälle liegt in ihrer Fähigkeit, eine umfassende und effektive Lösung zu bieten: Jeder Riss oder jede Verformung erfordert die Aktivierung eines abteilungsübergreifenden Untersuchungsteams. Dieses Team muss Betriebsaufzeichnungen, Medienanalysen, Düsenhistorie und Installationsprotokolle prüfen, um die Ursache zu ermitteln (z. B. Wasserstoffversprödung durch kurzzeitigen Überdruck, thermische Ermüdung durch Kühlungsversagen oder Rissbildung durch zu hartes Schleifmittel). Anschließend werden Präventivmaßnahmen optimiert (z. B. Installation von Druckpuffern im Zulauf, Verbesserung der Kühlkreisläufe oder Verwendung einer Rezeptur mit höherem Wolframgehalt) und Düsen verbessert (z. B. Verdickung der Düsenhalswand oder Verwendung einer DLC-Beschichtung mit Molybdänverstärkung). Die ausgereifte Funktionsweise dieses Systems zur Reaktion auf extreme Ausfälle wandelt Wolframlegierungsdüsen von „rissanfällig“ in solche, die sich „auch nach einem Riss schnell regenerieren“ können. Dies gibt Anwendern absolute Sicherheit hinsichtlich „Null Toleranz und Null Verlust“ unter extremsten Betriebsbedingungen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.4.4 Fehlervermeidungssystem: Risikomanagement über den gesamten Lebenszyklus von Wolframlegierungsdüsen

Das ganzheitliche Lebenszyklus-Risikomanagement ist ein strategisches System, das den Fokus von der „Behandlung“ auf die „Prävention“ von Fehlern verlagert. Es basiert auf den Prinzipien „Risikovermeidung durch Design, Null-Fehler-Produktion, Null-Gefahren im Gebrauch und Null-Umweltbelastung bei der Entsorgung“ und schafft einen nahtlosen Kreislauf von der Auswahl bis zur Verschrottung, um sicherzustellen, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Wolframlegierungsdüse während zehntausender Betriebsstunden nahezu null beträgt.

Risikominimierung in der Designphase: Eine FMEA in Kombination mit einer gekoppelten CFD/Finite-Elemente-Mehrfeldsimulation identifiziert im Vorfeld alle potenziellen Ausfallarten (z. B. Kavitation im Düsenhals, thermische Spannungsrisse und verschleißbedingte Kavitation). Doppelte Sicherheitsmargen werden bei Materialanteilen, Strömungskanalgeometrie und Oberflächenbeschichtungen eingeplant. Null-Fehler-Produktion: Nach jedem Prozessschritt erfolgt eine 100%ige Prüfung (Dichte, Abmessungen, Härte, Mikrostruktur). Anomalien werden sofort erkannt und eine 8D-Ursachenanalyse eingeleitet. Keine versteckten Gefahren im Betrieb: Beim Anwender wird ein „digitales Gesundheitsprotokoll“ für die Düse erstellt, das Parameter wie Durchflussrate, Druck, Temperaturanstieg und Geräuschentwicklung in Echtzeit überwacht. KI-gestützte Vorhersagemodelle warnen frühzeitig vor Verschleiß- oder Rissanzeichen. Tägliche Reinigung, wöchentliche Inspektionen und monatliche Volltests sind obligatorisch. Umweltfreundliche Entsorgung: Alle ausrangierten Düsen werden recycelt, und Wolframlegierungen können vollständig eingeschmolzen und wiederaufbereitet werden, sodass keine gefährlichen Abfälle entstehen. Die zentrale Säule des Risikomanagements ist das integrierte System aus Mensch, Maschine, Material und Umwelt: Mensch (zertifizierte Ingenieure, die den gesamten Prozess betreuen); Maschine (automatisierte Erkennungs- und Prognosesysteme); Material (doppelte Reserve an Düsen und Ersatzteilen); und Umwelt (Überwachung der Betriebsbedingungen und Echtzeit-Rückmeldung von Umweltparametern). Dieses System wandelt die Reaktion auf Störungen grundlegend: von reaktivem Handeln nach dem Auftreten eines Fehlers hin zu präventiver Vorgehensweise. Auch die Verwendung von Wolframlegierungsdüsen wird dadurch grundlegend verändert: vom Glücksspiel mit der Lebensdauer hin zur vorausschauenden Planung.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsdüsen

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/cm³), 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

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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

Kapitel 8 Häufige Probleme mit Wolframlegierungsdüsen

8.1 Häufige Probleme bei der Herstellung von Wolframlegierungsdüsen

Wolframlegierungsdüsen sind extrem lang und reagieren sehr empfindlich auf Fehler. Selbst geringfügige Kontrollmängel in jeder Phase können zu irreversiblen und schwerwiegenden Defekten im Endprodukt führen. Die überwiegende Mehrheit der frühen Ausfallfälle weltweit lässt sich auf die Fertigungsphase zurückführen, wo die Ursache gefunden werden kann.

8.1.1 Probleme bei der Rohstoffaufbereitung: Unzureichende Reinheit und übermäßige Verunreinigungen im Wolframpulver

Die Reinheit und der Verunreinigungsgehalt von Wolframpulver stellen die größten, oft übersehenen Gefahren für die Leistungsfähigkeit von Wolframlegierungsdüsen dar. Selbst Spuren von Sauerstoff, Kohlenstoff, Schwefel, Phosphor, Molybdän, Alkalimetallen usw. führen während des nachfolgenden Hochtemperatur-Sinterprozesses in der flüssigen Phase zur Bildung spröder Verbindungen, niedrigschmelzender Phasen an den Korngrenzen oder Restporen. Dies kann unter extremen Betriebsbedingungen direkt zu Rissen, Abplatzungen oder vorzeitiger Kavitationsperforation der Düse führen. Häufige Ursachen sind die unzureichende Kontrolle des Taupunkts der reduzierenden Atmosphäre, Schwankungen der Wasserstoffreinheit, übermäßige Zirkulation der Ammoniumparatungstat- Mutterlauge, Restelemente aus vorherigen Chargen im Mischbehälter sowie Sekundäroxidation durch Feuchtigkeitsaufnahme während der Lagerung des Wolframpulvers. Die Folgen sind äußerst gravierend: Überschüssiger Sauerstoff bildet ein Korngrenzenoxidnetzwerk, das bereits nach wenigen hundert Stunden zu Rissen entlang der Korngrenzen in der Düse führt. Überschüssiger Kohlenstoff führt zur Bildung von sprödem Wolframcarbid, was einen starken Abfall der Zähigkeit und direktes Absplittern beim Aufprall harter Partikel zur Folge hat. Phosphor- und Schwefelabscheidung führt zur Bildung eines Flüssigkeitsfilms an den Korngrenzen, wodurch die Düse bei hohen Temperaturen sofort durchbrennt. Die Prävention beruht ausschließlich auf einer sorgfältigen, durchgängigen Reinigung: Für jede Wolframpulvercharge werden an drei Punkten – zu Beginn, in der Mitte und am Ende – Proben entnommen. Dabei kommt eine Kombination aus vollständiger Element-Glimmentladungs-Massenspektrometrie und Inertgas-Schmelz-Infrarotspektroskopie zum Einsatz. Jede Abweichung von der internen Kontrolle führt zum Recycling der gesamten Charge. Der Reduktionsofen, der Mischtank und die Lagerbeutel werden einer Plasmareinigung und Vakuumtrocknung unterzogen. Der Wasserstofftaupunkt wird während des gesamten Prozesses online überwacht, um eine tiefe Trockenheit zu gewährleisten. Nur wenn das Wolframpulver „reiner als theoretisch erforderlich“ ist, können die Düsen über längere Zeiträume unter anspruchsvollsten Bedingungen betrieben werden.

8.1.2 Probleme beim Formgebungsprozess: Rissbildung und ungleichmäßige Dichte des Rohlings

Rissbildung und ungleichmäßige Dichte im Grünling stellen die gravierendsten, oft übersehenen Gefahren beim Formgebungsprozess dar. Risse entstehen häufig beim Entformen oder in der frühen Phase des Vorbrennens. Ihre Ursachen sind konzentrierte Pressspannungen, verstopfte Granulator-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verdampfungskanäle, ein zu hoher Pulverdichtegradient, eine ungleichmäßige Beschichtung mit Trennmittel oder das Versagen der isostatischen Pressdichtung. Ungleichmäßige Dichte entsteht durch Schwankungen der Pulverfließfähigkeit, Werkzeugverschleiß, Konstruktionsfehler im Druckübertragungsweg oder Schwankungen der Öltemperatur beim isostatischen Pressen. Sobald sich Risse bilden, können diese zu Oberflächenfalten oder, in schweren Fällen, zu tiefen Rissen führen, die beim Sintern unweigerlich eine Explosion verursachen. Nach dem Sintern manifestiert sich die ungleichmäßige Dichte als lokale Bereiche geringer Dichte, die einen natürlichen Ausgangspunkt für Hochdruckkavitation und Partikelerosion bilden und schließlich eine verheerende Kettenreaktion aus Lochfraß und Perforation auslösen. Prävention beginnt an der Quelle: Die Sprühtrocknungstemperatur des Granulats, der Bindemittelgehalt und die Kugelform der Partikel werden streng kontrolliert; beim Formgebungsverfahren kommt eine Zwei-Wege-Schwimmform mit mehrsegmentiger Haltekurve zum Einsatz; jeder Kaltpressballen wird auf Dichtheit geprüft und gewogen, und Öltemperaturschwankungen werden streng kontrolliert; nach dem Entformen jedes Grünlings wird die Dichtemessung zu 100 % wiederholt und verifiziert, und jegliche Dichteeinbrüche oder Mikrorisse werden sofort auf die Pulvercharge und die Pressparameter zurückgeführt. Erst wenn der Grünling eine „spannungsfreie und dichtefreie Zone“ aufweist, kann der Sinterprozess als theoretisch dicht betrachtet werden.

8.1.3 Probleme beim Sinterprozess: Verformung und unzureichende Dichte des Sinterkörpers

Das Sintern stellt den kritischsten Schritt für Wolframlegierungsdüsen dar, da es das Pulver in funktionsfähige Bauteile umwandelt. Verformung und unzureichende Dichte sind die beiden häufigsten Fehlerursachen. Verformung entsteht hauptsächlich durch einen Überschuss an flüssiger Phase, der zum Kollaps des Wolframgerüsts führt, eine ungeeignete Konstruktion der Stützkammer, unkontrollierte Aufheiz- und Abkühlraten sowie eine ungleichmäßige Ofenatmosphäre oder ein ungleichmäßiges Temperaturfeld. Unzureichende Dichte resultiert aus einer zu niedrigen Maximaltemperatur, einer zu kurzen Haltezeit, einem zu hohen Wasserstofftaupunkt, einer unvollständigen Entfernung von Restkohlenstoff oder einer unvollständigen Entgasung. Nach der Verformung sind die Koaxialität des Düsenhalses, der Kegelwinkel und die Kontur des Expansionsbereichs verzerrt, und selbst die präziseste Nachbearbeitung kann dies nicht mehr beheben. Unzureichende Dichte hinterlässt Mikroporen oder miteinander verbundene Poren, die den Ausgangspunkt für Hochdruckkavitation und Partikelerosion bilden und innerhalb weniger hundert Stunden zum Perforationsversagen führen. Die Prävention muss äußerst präzise erfolgen: Jede Ofenbeladung wird dreidimensional unter Berücksichtigung von Schwerkraft und Flüssigkeitsströmung simuliert, und die Stützpunkte werden wissenschaftlich verteilt. Die Heiz- und Kühlkurven werden in mehr als zehn Segmenten präzise gesteuert, insbesondere ist die Abkühlgeschwindigkeit in der Erstarrungszone der Bindemittelphase extrem langsam; der Wasserstofftaupunkt wird zur Tieftrocknung während des gesamten Prozesses genutzt; die maximale Temperatur und die Haltezeit werden präzise nach der Größe des Rohlings und dem Längen-Durchmesser-Verhältnis abgestuft; nach dem Abstich des Ofens wird eine doppelte Inspektion mittels 100% industrieller CT + Archimedes-Entwässerungsmethode durchgeführt, und jeder Ofen, der unterhalb der theoretischen Dichtegrenze liegt, wird erneut angeheizt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1.4 Probleme bei der Nachbearbeitung : Unzureichende Präzision der Strömungskanäle und Oberflächenfehler

Die Nachbearbeitung ist der letzte Schritt von „akzeptabler Dichte“ zu „perfekter Funktion“ der Düse. Unzureichende Präzision des Strömungskanals und Oberflächenfehler können jedoch alles ruinieren. Probleme mit der Strömungskanalpräzision entstehen oft durch vorzeitigen Verschleiß der Honstäbe, thermische Ausdehnung der Vorrichtung, Temperaturschwankungen und mangelnde Erfahrung des Bedieners. Oberflächenfehler entstehen durch Verunreinigungen der Polierflüssigkeit, Abweichungen der Beschichtungsparameter, Überhitzung beim Laserschmelzen und Restionen oder -partikel nach der Reinigung. Zu große Abweichungen im Düsenhalsdurchmesser und der Rundheit führen sofort zu Schnittverzerrungen; Abweichungen im Kegelwinkel und der Kontur des Expansionsbereichs führen zum vollständigen Verlust der Kontrolle über die Zerstäubungspartikelgröße und den Strahldivergenzwinkel; Oberflächenkratzer, Abplatzungen der Beschichtung oder Rückstände verursachen sofort Partikelanhaftungen und Kavitationskeime. Vorbeugung erfordert akribische Detailarbeit : Honstäbe werden nach einigen Zyklen obligatorisch vermessen und nachgeschliffen; alle Vorrichtungen bestehen aus Materialien mit geringer Wärmeausdehnung; der Bearbeitungsbereich unterliegt einer extrem strengen Temperatur- und Feuchtigkeitskontrolle. Die Poliersuspension wird täglich erneuert und bis in den Submikronbereich gefiltert. Die Haftung der PVD/CVD-Beschichtung wird für jede Charge an Standardplatten geprüft. Das Reinigungswasser weist eine extrem niedrige Leitfähigkeit auf. Vor Verlassen des Werks werden alle Düsen einer dreifachen Endkontrolle unterzogen: mit einem Weißlichtinterferometer, einem pneumatischen Messgerät und einem hochauflösenden Endoskop. Abweichungen im Strömungskanal oder Oberflächenfehler führen zu sofortiger Nachbearbeitung. Nur wenn die Nachbearbeitung eine Präzision im Düsenhals erreicht, die die Konstruktion übertrifft, und eine Oberflächenreinheit, die einen Spiegel übertrifft, kann die Wolframlegierungsdüse auch unter anspruchsvollsten Betriebsbedingungen sofort nach dem Auspacken optimale Leistung erbringen.

8.2 Häufige Probleme bei der Auswahl und Anpassung von Wolframlegierungsdüsen

Fehlauswahl und falsche Komponenten sind die häufigsten, teuersten und gleichzeitig am einfachsten zu vermeidenden Fehlerquellen für Anwender. Eine ansonsten einwandfreie Wolframlegierungsdüse kann, wenn das falsche Mischungsverhältnis, die falsche Struktur oder die falschen Spezifikationen gewählt werden, oft zu einem noch schlechteren Ergebnis führen als der Kauf eines minderwertigen Produkts – denn sie versagt im entscheidenden Moment vollständig, trotz ihres einwandfreien Zustands.

8.2.1 Problem der Anpassung der Betriebsbedingungen: Temperatur- und Druckabweichungen zur Düsenleistung

Der häufigste Fehler bei der Düsenauswahl ist die direkte Verwendung einer Standarddüse aus Wolfram-Nickel-Eisen unter Hochtemperatur- und Hochdruckbedingungen. Anwender lassen sich oft von der weit verbreiteten Annahme leiten, dass „Wolframlegierungen generell hitzebeständig sind“. Dabei wird der grundlegende Unterschied ignoriert, dass die Bindemittelphase oberhalb von 800 °C rapide erweicht und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

flüssige Phasenrückstände zum Kollaps der Düsenmündung führen. Die Folge: Die Düse erscheint zunächst normal, zeigt aber nach einigen hundert Stunden plötzlich eine rapide Erweiterung der Düsenmündung, Strahldivergenz oder sogar eine Erweichung und Verformung der gesamten Düse. Ein weiterer typischer Fehler ist die Verwendung einer für niedrige Temperaturen optimierten Formulierung für extrem hohe Temperaturen. Während das Wolframgerüst hart ist, oxidiert und abgetragen sich die Bindemittelphase vorzeitig, wodurch sich Wolframpartikel ablösen und die Rauheit der Innenwand stark zunimmt. Die Folgen sind oft ein mehrtägiger Stillstand der gesamten Produktionslinie, Schäden an Pumpen, Ventilen und Rohrleitungen sowie die Verschrottung von Chargen fertiger Produkte. Der richtige Ansatz besteht darin, die höchste Dauertemperatur, die höchste Momentantemperatur, den höchsten Arbeitsdruck und die höchste Druckimpulsfrequenz in einer Tabelle aufzulisten und dann die Rezeptur auf der Grundlage des Worst-Case-Szenarios um eine Stufe höher anzupassen, sodass kein Raum für den Ansatz "gerade genug" bleibt.

8.2.2 Problem bei der Strukturauswahl: Der Strömungskanaltyp entspricht nicht den Zerstäubungsanforderungen.

Strukturelle Fehlanpassung ist die zweite große Fehlerquelle bei der Düsenauswahl. Typischerweise werden kurze Laval-Düsen oder Düsen mit geradem Loch für Anwendungen verwendet, die eine ultrafeine Zerstäubung und hohe Partikelgeschwindigkeiten erfordern. Obwohl der Durchfluss ausreichend sein mag, ist die zerstäubte Partikelgröße groß und die Partikelgeschwindigkeit niedrig, was zu schlechter Beschichtungshaftung, geringer Wirkstoffaufnahme und niedriger Kaltgas-Abscheidungseffizienz führt. Umgekehrt führt die Verwendung ultralanger Laval-Düsen für die Reinigung oder das Schneiden mit hohem Durchfluss zu übermäßigem Gegendruck, einem Anstieg der Pumpenlast und verstärkter Kavitation im Düsenhals. Ein weiterer häufiger Fehler ist die starre Installation von Mehrhalsdüsen mit Einzelhalsdüsenkörpern, was zu teilweiser Verstopfung des Düsenhalses und ungleichmäßiger Abdeckung führt; oder die Installation von Schnellwechsel-Bajonett Düsen in Brennkammern, die eine dauerhafte Verschweißung erfordern, was zu Unlösbarkeit und thermischer Spannungskonzentration führt. Diese Probleme beruhen im Wesentlichen auf dem erzwungenen Austausch scheinbar ähnlicher Strukturen, wobei der entscheidende Einfluss des Laval-Expansionswinkels, des Verhältnisses von Düsenhalslänge zu Düsendurchmesser und der Gestaltung des stationären Strömungsabschnitts auf die Strahlqualität ignoriert wird. Bei der Düsenauswahl müssen zunächst die Kernanforderungen klar definiert werden (Priorität Durchflussrate oder Zerstäubungspriorität, Priorität Geschwindigkeit oder Gleichmäßigkeit), und anschließend muss der Strömungskanaltyp eins zu eins abgestimmt werden. Eine „Universaldüse“ darf niemals als universelle Lösung betrachtet werden.

8.2.3 Probleme mit der Materialverträglichkeit: Unverträglichkeit zwischen der Legierungszusammensetzung und korrosiven Medien.

Materialinkompatibilität ist der heimtückischste und verheerendste Fehler bei der Materialauswahl. Ein typisches Beispiel ist die Verwendung eines Wolfram-Nickel-Eisen-Systems in stark sauren, stark alkalischen oder chlorhaltigen Hochtemperaturumgebungen. Dies führt zu selektiver Korrosion und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Auflösung des Nickels, wodurch sich das freiliegende Wolframgerüst schnell ablöst und die Düse innerhalb weniger Tage löchrig wird. Ein weiteres Beispiel ist die Verwendung eines Wolfram-Nickel-Kupfer-Systems in Hochtemperatur-Oxidationsflammen. Hier schmilzt und oxidiert die Kupferphase zuerst, was zu Blasenbildung an der Oberfläche und rascher Abtragung der Düse führt. Ein weiterer häufiger Fehler ist die fortgesetzte Verwendung nickelhaltiger Systeme in pharmazeutischen und lebensmittelrelevanten Umgebungen. Dies führt zur langsamen Freisetzung von Nickelionen, die Produkte kontaminieren und den Rückruf ganzer Chargen von Arzneimitteln oder Lebensmitteln nach sich ziehen können. Oder die Verwendung herkömmlicher industrieller Oberflächenbehandlungen in Reinräumen von Kernkraftwerken führt zu überhöhten Spurenkonzentrationen extrahierbarer Stoffe und löst die strengsten regulatorischen Grenzwerte aus. Diese Probleme treten oft zunächst unerwartet auf und brechen erst einige Monate später plötzlich aus, was zu Verlusten in Millionenhöhe führt. Der richtige Ansatz besteht darin, eine vollständige Zusammensetzungstabelle des Mediums zu erstellen (einschließlich Spurenionen, pH-Wert, Temperatur und Redoxpotential) und anschließend Immersions- und elektrochemische Korrosionstests an jedem Medium in verschiedenen Verhältnissen durchzuführen, z. B. an Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen, Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungen, ultrareinen medizinischen Legierungen und nichtmagnetischen Legierungen. Jegliche Abweichungen sollten umgehend aus dem jeweiligen System entfernt werden.

8.2.4 Probleme bei der Spezifikationsauswahl: Diskrepanz zwischen Düsendurchmesserparametern und Durchflussanforderungen

Die falsche Einstellung des Düsenhalsdurchmessers ist ein häufiger, grundlegender Fehler, der von Anwendern begangen und von Verkäufern leicht vertuscht wird. Typischerweise wird blindlings der kleinste Düsenhalsdurchmesser als optimal angesehen. Dies führt zwar zu einem kleinen Düsenhals, aber zu einem übermäßig hohen Gegendruck, den die Pumpe nicht bewältigen kann, was einen stark unzureichenden Durchfluss zur Folge hat. Umgekehrt führt die Wahl eines übermäßig großen Düsenhalsdurchmessers, um einen ausreichenden Durchfluss zu gewährleisten, zu einer völlig unkontrollierten Strahlgeschwindigkeit und Partikelgröße. Dies verursacht einen starken Abfall der Schneidleistung und eine Verschlechterung der Beschichtungsqualität. Ein weiterer häufiger Fehler ist die Vernachlässigung des Einflusses des Längen-Durchmesser-Verhältnisses und des Expansionswinkels. Selbst bei gleichem Düsenhalsdurchmesser führen unterschiedliche Expansionsquerschnitte zu völlig unterschiedlichen Strahldivergenzwinkeln und Partikelgeschwindigkeiten. Die direkte Anwendung der Düsenhalsdurchmesserparameter von Thermospritzdüsen auf das Wasserstrahlschneiden führt zudem zu einer Oberflächenrauheit, die die Normen um ein Vielfaches überschreitet. Ein oft übersehener Fehler ist die Akkumulation von Toleranzen im Düsenhalsdurchmesser zwischen verschiedenen Düsenchargen. Dies führt zu ungleichmäßigem Durchfluss und Qualitätsverlusten, wenn mehrere Düsen parallel geschaltet sind. Im Wesentlichen behandeln diese Probleme alle den Düsenhalsdurchmesser als alleinigen bestimmenden Parameter und ignorieren dabei die komplexe Wechselwirkung zwischen Düsenhalsdurchmesser, Gegendruck, Durchflussrate, Zerstäubungspartikelgröße und Strahldivergenzwinkel. Der korrekte Ansatz besteht darin, zunächst die Zieldurchflussrate und die Zerstäubungspartikelgröße zu bestimmen, dann die Düse anhand der vom Lieferanten bereitgestellten dreidimensionalen Kennlinie für

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Düsenhalsdurchmesser, Druck und Durchflussrate präzise auszuwählen, eine Durchflussreserve von 10–15 % einzuplanen und schließlich sicherzustellen, dass die Toleranz des Düsenhalsdurchmessers innerhalb derselben Charge im engstmöglichen Bereich liegt. Nur durch die Umwandlung des Düsenhalsdurchmessers von einem Näherungswert in eine präzise Lösung kann die Wolframlegierungsdüse ihre theoretische Leistungsfähigkeit voll ausschöpfen.

Jeder Fehler bei der Auswahl und Kompatibilität ist kein „kleines Problem“, sondern ein „Selbstmord“, der eine perfekte Düse in Schrott verwandelt. Erfahrene Anwender haben den Auswahlprozess längst zu einem geschlossenen Kreislauf aus „erst prüfen, dann kaufen, dann skalieren und dauerhaft festlegen“ optimiert, während normale Anwender immer noch den Preis für Impulskäufe zahlen, die auf „günstigen Preisen“ oder der Aussage des Verkäufers „alle Düsen seien verwendbar“ basieren.

8.3 Häufige Probleme bei der Installation und Verwendung von Wolframlegierungsdüsen

Selbst bei hochwertigsten Wolframlegierungsdüsen sind die meisten Ausfälle in der Anfangsphase nicht auf Herstellungsfehler, sondern auf Installations- und Nutzungsfehler zurückzuführen. Jede noch so geringfügige Abweichung im Betrieb oder ein Versäumnis des Managements kann ihre theoretische Lebensdauer halbieren oder sogar katastrophale Folgen haben.

8.3.1 Probleme bei Installation und Betrieb: Positionierungsabweichung und unzureichende Abdichtung

Positionsabweichungen und mangelhafte Abdichtung sind die häufigsten und folgenreichsten Installationsprobleme vor Ort. Positionsabweichungen entstehen, wenn sich die Bediener auf ihr Gefühl verlassen oder mit herkömmlichen Schraubenschlüsseln anziehen. Dies führt zu einem Rundlauf des Düsenaußenkreises, einer Neigung der Stirnfläche und einer Abweichung der Düsenhalsachse von der Achse des Pistolenkörpers. Dadurch werden der Strahl abgelenkt und die Rückstoßkraft ungleichmäßig verteilt, was die Materialermüdung des Pistolenkörpers und den Verschleiß des Düsenhalses rasch verstärkt. Mangelhafte Abdichtung entsteht oft durch die falsche Wahl des Dichtringmaterials, Verdrehen oder Weglassen des Dichtrings während der Installation, fehlende Antiextrusionsringe, Partikel oder Kratzer auf der Dichtfläche sowie ungleichmäßige Vorspannkraft aufgrund eines zu geringen oder zu hohen Drehmoments. Unter hohem Druck kann ein Austritt des Mediums entlang der Dichtfläche entweder zu einem unkontrollierten Durchfluss oder, in schweren Fällen, zu plötzlichen Hochdruckstrahlen führen, die Personal verletzen oder umliegende Anlagen beschädigen können.

8.3.2 Probleme aufgrund unsachgemäßer Fehlersuche: ungenaue Durchfluss- und Druckkalibrierung

Düse schnell ruinieren. Das häufigste Problem ist die direkte Inbetriebnahme der Maschine mit Nenndruck, wobei die Einlaufphase bei niedrigem Druck ignoriert wird. Dadurch dehnen sich Restspannungen und mikroskopische Defekte unter dem ersten Hochdruckeindruck schlagartig aus. Ein weiterer typischer Fehler ist die alleinige Verwendung des Manometerdrucks an der Pumpstation ohne

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tatsächliche Messung von Gegendruck und Durchflussrate der Düse. Dies führt zu scheinbar normalen Parametern, während die tatsächliche Durchflussrate deutlich abweicht. Inkonsistenzen zwischen Medientemperatur und tatsächlichen Betriebsbedingungen, uneinheitliche Inbetriebnahme- und Produktionsschichtstandards sowie das Versäumnis, die erforderlichen stufenweisen Druckerhöhungen durchzuführen und vollständige Kennlinien aufzuzeichnen, können ebenfalls zu versteckten Problemen in der Düsenhalsgeometrie und Oberflächenbeschaffenheit während der Inbetriebnahme führen. Der Kern einer unsachgemäßen Inbetriebnahme liegt in der Vereinfachung der präzisen Kalibrierung, die als „zweite Fertigung“ betrachtet werden sollte, hin zu einem „Hauptsache, die Düse sprüht beim Einschalten“. Dadurch weicht die Düse bereits ab der ersten Minute vom vorgesehenen Betriebsbereich ab.

8.3.3 Problem der Anpassung an die Betriebsbedingungen: Die Leistung verschlechtert sich unter extremen Bedingungen zu schnell.

Viele Anwender stellen fest, dass die Düsenlebensdauer unter extremen Betriebsbedingungen deutlich kürzer ist als erwartet. Sie sind sich nicht bewusst, dass dies daran liegt, dass die bei der Auswahl verbleibende „Betriebsreserve“ durch übermäßige Belastungen im Betrieb vollständig aufgebraucht wird. Plötzliche Temperaturschocks, die die Toleranzgrenzen des Mischungsverhältnisses überschreiten, Druckpulsationen, die die Auslegungstoleranzen überschreiten, das plötzliche Einbringen nicht deklarierter, hochkorrosiver Komponenten in das Medium sowie eine abrasive Härte oder Partikelgröße, die den ursprünglichen Prüfbereich überschreitet, können dazu führen, dass Düsen, die ursprünglich für Zehntausende von Betriebsstunden ausgelegt waren, innerhalb kurzer Zeit drastische Erweichungen, Kavitationsabplatzungen oder selektive Korrosion aufweisen. Die Ursache für diesen raschen Leistungsabfall liegt darin, dass Anwender Wolframlegierungsdüsen als ein Material behandeln, das „bedingungslos beständig gegen extreme Bedingungen“ ist, anstatt sie als Präzisionsbauteile zu erkennen, die nur innerhalb klar definierter Temperatur-, Druck- und Mediumgrenzen optimale Leistung erbringen.

8.3.4 Probleme beim kollaborativen Betrieb: Unzureichende Kompatibilität mit unterstützender Ausrüstung

Wolframlegierungsdüsen sind niemals isolierte Bauteile; sie bilden ein eng gekoppeltes System mit Pumpen, Ventilen, Rohrleitungen, Düsenkörpern, Filtersystemen und Kühlkreisläufen. Unzureichende Kompatibilität äußert sich häufig in folgenden Punkten: übermäßige Druckpulsationen im Zulauf, die zu kontinuierlichem Wasserschlag führen; unzureichende Filtergenauigkeit, wodurch harte Fremdkörper in die Düsenmündung gelangen können; unkontrollierter Kühlwasserdurchfluss oder -temperatur, die lokale Überhitzung verursachen; unzureichende Düsensteifigkeit, die zu Reibverschleiß an der Düsendichtfläche führt; und ungleichmäßiger Widerstand in parallelen Rohrleitungen, der erhebliche Unterschiede in den tatsächlichen Durchflussraten zwischen den Düsen zur Folge hat. Diese Probleme werden oft fälschlicherweise auf „Qualitätsmängel der Düse“ zurückgeführt, resultieren aber in Wirklichkeit daraus, dass die Düse nicht als die empfindlichste und am stärksten beanspruchte Komponente im Systemdesign betrachtet wird und somit keine entsprechenden Einschränkungen auf die unterstützenden Komponenten angewendet werden. Systemische Mängel wie das Fehlen eines

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Druckstabilisierungsspeichers in der Pumpe, eine ungleichmäßige Filterung, unzureichende Düsensteifigkeit und das Fehlen einer unabhängigen Temperaturregelung in den Kühlsystemen verkürzen kontinuierlich und schleichend die Lebensdauer der Düse. Das Wesen unzureichender Kompatibilität im kollaborativen Betrieb besteht darin, Wolframlegierungsdüsen als „Verbrauchsmaterialien zu behandeln, die frei kombiniert werden können“, anstatt ihre Anforderungen als Kernprinzip für die Konfiguration des gesamten Systems zu priorisieren.

Jegliche Probleme bei Installation und Betrieb können selbst die hochwertigsten Wolframlegierungsdüsen im Handumdrehen in teuren Schrott verwandeln. Anwender, die tatsächlich lange Lebensdauern erreichen, haben Installation und Inbetriebnahme bereits zu einem ebenso sorgfältig durchgeführten Prozess gemacht wie die Fertigung. Hinter den meisten anfänglichen Ausfällen steckt oft nur eine beiläufige Bemerkung vor Ort: „So installieren wir die immer“ oder „Solange es gut genug ist, wird es schon gehen.“ Die tatsächliche Lebensdauer einer Wolframlegierungsdüse wird nicht vom Hersteller, sondern von der Disziplin vor Ort bestimmt.

8.4 Häufige Probleme bei der Wartung und Fehlersuche an Wolframlegierungsdüsen

Wartung und Fehlersuche bilden die letzte Verteidigungslinie im Lebenszyklus von Wolframlegierungsdüsen, sind aber gleichzeitig die schwächsten Glieder, die am leichtesten übersehen werden und am ehesten zu einem Totalausfall führen. Viele Anwender investieren in der ersten Hälfte des Lebenszyklus viel Geld in hochwertige Düsen, doch in der zweiten Hälfte, aufgrund nachlässiger Wartung, voreiliger Diagnose und zögerlicher Fehlersuche, wird aus einer Düse, die Zehntausende von Stunden hätte dienen können, ein Schrottteil, das nur noch wenige Hundert Stunden hält.

8.4.1 Probleme aufgrund mangelhafter Wartung: unvollständige Reinigung und Versäumnisse bei der Inspektion

Unvollständige Reinigung und mangelhafte Inspektion sind die häufigsten und heimtückischsten Fehler bei der Instandhaltung. Ein typisches Beispiel ist das einfache Ausblasen der Maschine mit Druckluft nach dem Abschalten. Abrasive Partikel, kristalline Salze und halbgeschmolzenes Pulver lagern sich mit der Zeit an der Innenwand ab und bilden allmählich eine harte Schicht, die schließlich den Düsenhals verstopft oder Kavitation begünstigt. Ein weiterer häufiger Fehler ist die Reinigung nur des sichtbaren Düsenhalses und der Stirnfläche, wobei die tieferen Bereiche des Expansionsbereichs und die Rückseite der Dichtfläche vernachlässigt werden. Dies führt zu immer stärkeren lokalen Ablagerungen und einem langsamen, unerklärlichen Rückgang des Durchflusses. Noch fataler ist die mangelhafte Inspektion: die tägliche Sichtprüfung ohne Messung des Düsenhalsdurchmessers, die wöchentliche Messung ohne Aufzeichnung historischer Kurven und das Auslassen der monatlichen Komplettprüfung aufgrund von Produktionsengpässen. Die Folge ist eine schleichende Vergrößerung des Düsenhalses und die allmähliche Ausbreitung von Oberflächenmikrorissen. Bis diese entdeckt werden, ist das Zeitfenster für eine Reparatur bereits verstrichen, und die gesamte Maschine muss verschrottet werden. Diese Probleme rühren im Wesentlichen daher, dass Wartung als „entbehrliche Reinigung“ und nicht als „präzise Arbeit, die die Lebensdauer bestimmt“ betrachtet wird. Eine ordnungsgemäße Wartung muss in einem

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

geschlossenen, obligatorischen, dokumentierten und nachvollziehbaren Prozess erfolgen. Jede „Gut genug“- oder „Das mache ich nächstes Mal“-Mentalität wird letztendlich durch die Arbeitsbedingungen gnadenlos bestraft.

8.4.2 Verschleiß- und Korrosionsprobleme: Ungewöhnlicher Verschleiß und starke lokale Korrosion.

Ungewöhnlicher Verschleiß und lokale Korrosion sind oft nicht auf Materialfehler selbst zurückzuführen, sondern auf die kombinierte Wirkung unkontrollierter Wartung und unzureichender Betriebsführung. Typischer ungewöhnlicher Verschleiß äußert sich in einer sichelförmigen, tiefen Vertiefung an einer Seite des Düseneinlaufs oder in einer ungewöhnlichen Rauheit in einem Abschnitt des Expansionssegments. Die Hauptursachen sind in der Regel ein Ausfall des vorgelagerten Filters, der zum direkten Eintritt großer Partikel führt, eine Abweichung des Strahlwinkels, die ungleichmäßigen Verschleiß verursacht, und eine ungleichmäßige Kühlung, die zu lokaler Kavitation führt. Lokalisierte Korrosion ist tückischer: Ringförmige Korrosionsrillen bilden sich in der Nähe der Dichtfläche, Lochfraßkorrosion tritt an der Stirnfläche auf, und selektive Auflösung findet am Düseneinlauf statt. Ursachen hierfür sind häufig die Alterung und Undichtigkeit des Dichtrings, die zu Medienrückständen führt, Reste von Reinigungsflüssigkeit, die galvanische Korrosion verursachen, und unzureichende Trocknung während Stillstandszeiten, die zu konzentrierter Feuchtigkeitskorrosion führt. Ein weiterer schwerwiegender Vorfall ist das lokale Ablösen der Oberflächenbeschichtung, wodurch die Substratkorrosion beschleunigt wird. Sobald sich die DLC- oder Borschicht ablöst, wird die freiliegende Bindemittelphase innerhalb weniger Tage selektiv aufgelöst, und die Korrosionsgrube weitet sich rasch zu einer Perforation aus. Diese Probleme scheinen „Düsenfehlfunktionen“ zu sein, sind aber in Wirklichkeit auf ein komplettes Versagen bei Wartung und Überwachung zurückzuführen. Nur wenn abnormaler Verschleiß und lokale Korrosion als „systemische Störungen“ und nicht als „Düsenprobleme“ behandelt werden, lässt sich ihr Wiederauftreten wirksam verhindern.

8.4.3 Probleme bei der Fehlerdiagnose: Fehlinterpretation von Ursachen für anormale Durchflussmengen und Leckagen

Fehldiagnosen sind die Hauptursache dafür, dass kleine Probleme zu großen werden. Ein typisches Beispiel ist die Vermutung von Düsenverschleiß und -erweiterung nach einem Durchflussabfall, obwohl die tatsächliche Ursache ein verstopfter Filter oder eine reduzierte Pumpenleistung ist. Oder der sofortige Düsenwechsel nach Entdeckung eines Lecks zeigt, dass eine alternde Dichtung die eigentliche Ursache ist, wodurch eine teure Düse verschwendet wird. Eine weitere häufige Fehldiagnose ist die Behandlung von Kavitationsnarben als normaler Verschleiß, wobei lediglich oberflächliche Polierreparaturen durchgeführt werden. Die eigentliche Ursache der Kavitation (Druckpulsation, zu hoher Gasgehalt) bleibt jedoch bestehen, und die Reparaturschicht blättert nach wenigen Tagen wieder ab. Noch gravierender ist die Fehldiagnose selektiver Korrosion der Bindemittelphase als „Oberflächenkratzer“, wodurch die Düse trotz des Problems weiter verwendet wird, was schließlich zur Korrosion und Perforation der gesamten Düse führt. Im Kern der Fehldiagnose liegt ein Mangel an systematischem Denken und professionellen Werkzeugen, stattdessen verlässt man sich auf Erfahrung, Intuition oder die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annahme, dass „es schon immer so war“. Eine korrekte Diagnose erfordert eine vollständige Abfolge von Schritten: „Phänomenaufzeichnung → Messung mit mehreren Instrumenten → schrittweiser Ausschluss → metallografische Überprüfung“. Jeder ausgelassene Schritt oder jede falsche Annahme kann ein reparierbares kleines Problem in einen schwerwiegenden Unfall verwandeln, der die gesamte Düse unbrauchbar macht.

8.4.4 Probleme bei Austausch und Aufrüstung: Vorzeitiger Austausch anfälliger Teile und nicht kompatible Modelle

Verzögerter Austausch von Verschleißteilen und nicht zusammenpassende Teile zählen zu den gravierendsten und schwerwiegendsten Wartungsfehlern. Typische Beispiele: Deutlich gealterte und rissige Dichtungsringe werden weiterverwendet, weil sie „noch brauchbar“ erscheinen. Dies führt letztendlich zu Hochdruckleckagen, die Düse und Pistolenkörper zerstören. Verschleiße Führungshülsen verursachen übermäßige Koaxialität, werden aber nicht ausgetauscht, was nach monatelangem ungleichmäßigem Verschleiß zum plötzlichen Bruch des Düsenhalses führt. Nicht zusammenpassende Teile sind noch fataler: Fluorkautschukringe, die unter hohen Temperaturen eingesetzt werden, verkohlen sofort. Die Verwendung von Standard-Industriedüsen als medizinische Düsen führt zu übermäßiger Ionenfreisetzung. Das gewaltsame Einsetzen alter Schnellwechseldüsen in neue Pistolenkörper verursacht Blockierungen und verhindert deren Demontage. Ein weiterer häufig übersehener Fehler ist der Austausch nur der Düse bei Modernisierungen, ohne die passenden Dichtungen und Führungshülsen zu ersetzen. Neue, hochpräzise Düsen werden mit gealterten, unpräzisen und anfälligen Teilen kombiniert, was ihre Lebensdauer deutlich verkürzt. Diese Probleme rühren im Wesentlichen daher, dass Düsen aus Wolframlegierung als „unabhängige Bauteile“ und nicht als „Systemkomponenten“ behandelt werden. Dabei wird der entscheidende Einfluss peripherer, empfindlicher Teile wie Dichtungsringe, Führungshülsen, Schnellwechselbajonette und Kühlmäntel auf die Lebensdauer der Düsen außer Acht gelassen. Der korrekte Austausch und die Aufrüstung müssen der eisernen Regel „Alles ersetzen beim Austausch, alles aufrüsten beim Aufrüsten“ folgen: Beim Austausch von Düsen müssen alle medienberührenden Teile, Dichtungen und Führungsteile gleichzeitig auf die neueste passende Version aktualisiert werden. Man kann niemals alten Wein in neue Schläuche füllen.

Jegliches Problem bei Wartung und Fehlersuche ist keine Kleinigkeit, sondern führt vielmehr zu einer schleichenden Zerstörung einer Wolframlegierungsdüse mit extrem langer theoretischer Lebensdauer, die dadurch zu einem kurzlebigen Verschleißteil wird. Anwender, die Wert auf Langlebigkeit legen, betrachten die Wartung daher seit Langem als einen Kernprozess, der der Produktion gleichkommt.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsdüsen

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/cm³), 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

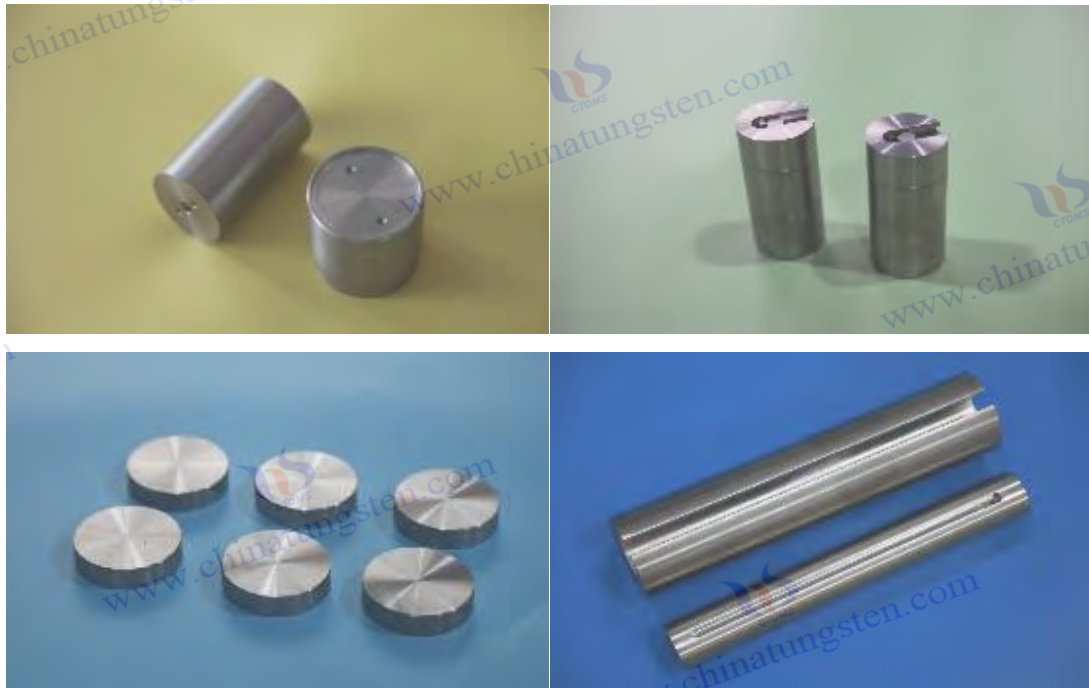
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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

Anhang A: Chinesischer Standard für Wolframlegierungsdüsen

Chinas Normensystem für [Wolframlegierungsdüsen](#) bildet einen umfassenden Rahmen, der primär auf nationalen Normen (GB/T-Reihe) basiert und durch Industrienormen (HG/T-, JB/T- und YY/T-Reihe) ergänzt wird. Es deckt die gesamte Wertschöpfungskette ab, von der Materialzusammensetzung über Fertigungsprozesse und Leistungsanforderungen bis hin zu Prüfmethoden, Qualitätskontrolle und Umweltverträglichkeit. Diese Normen wurden gemeinsam von der Staatlichen Marktregulierungsbehörde (SAMR) und relevanten Branchenverbänden erarbeitet, um die sichere und effiziente Anwendung von Wolframlegierungsdüsen in Bereichen wie thermischem Spritzen, Wasserstrahlschneiden, Laserauftragschweißen und industrieller Reinigung zu gewährleisten.

GB/T 3458-2016, „Hochdichte Wolframlegierungen“, ist eine grundlegende Norm, die den Bereich der chemischen Zusammensetzung, die Dichtehomogenität, die mechanischen Eigenschaften und die Anforderungen an die Mikrostruktur von Wolframlegierungen für Düsen festlegt. Sie ist anwendbar für die Materialauswahl von Düsen für das thermische Spritzen und die Hochdruckreinigung. GB/T 4185-2017, „Wolframpulver für Hartmetalle“, erweitert die Spezifikationen für Wolframpulver speziell für Düsen und betont die Reinheit und die Kontrolle der Partikelgrößenverteilung während des Reduktionsprozesses, um die Dichte des Düsenhalses zu gewährleisten. Obwohl HG/T 2077-2017, „Technische Bedingungen für Wolframlegierungs-Angelsenken“, für den zivilen Gebrauch bestimmt ist, wurden ihre Bestimmungen zur Korrosionsbeständigkeit und Oberflächenbehandlung für industrielle Düsennormen übernommen. Branchenspezifische Normen wie JB/T 12778-2017, „Technische Bedingungen für verschleißfeste Kugeln aus hochdichten Legierungen“, gelten für die Überprüfung der Verschleißfestigkeit von Düsen, während YY/T 1636-2019, „Technische Anforderungen an medizinische Wolframlegierungs-Kollimatoren“, die Biokompatibilität und Strahlenschutzleistung von Düsen in medizinischer Qualität spezifiziert. Im Hinblick auf den Umweltschutz gewährleistet GB/T 33357-2016, „Bestimmung der Schwermetallmigration in Wolframlegierungsprodukten“, ein null Kontaminationsrisiko für Düsen bei der Reinigung von Lebensmitteln und pharmazeutischen Produkten.

Diese Normen legen Wert auf lückenlose Rückverfolgbarkeit und Zertifizierung durch Dritte. Hersteller müssen Audits des Qualitätsmanagementsystems nach ISO 9001 bestehen, und Düsen müssen beim Verlassen des Werks mit Chargenberichten und Leistungskurven versehen sein. Die Strenge und zukunftsorientierte Ausrichtung des chinesischen Normensystems verschaffen Wolframlegierungsdüsen einen bedeutenden Wettbewerbsvorteil beim Export in europäische und amerikanische Märkte.

Anhang B Internationale Normen für Wolframlegierungsdüsen

Internationale Normen für Wolframlegierungsdüsen werden von ASTM International und ISO vorgegeben. Der Fokus liegt auf Materialspezifikationen, Prüfmethoden und Anwendungsrichtlinien, um einen weltweit einheitlichen Rahmen für Standards zu schaffen und so die Interoperabilität und Zuverlässigkeit von Düsen in grenzüberschreitenden Prozessen wie dem thermischen Spritzen, dem Wasserstrahlschneiden und der Laserbearbeitung zu gewährleisten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ASTM B777-20, „Standard Specification for Tungsten-Based High-Density Alloys“, ist eine Kernnorm, die Zusammensetzungsbereich, Dichtekonsistenz, Zugfestigkeit, Härte und Hochtemperaturverhalten von Wolframlegierungen für Düsen detailliert beschreibt. Sie gilt für industrielle Sprüh- und Schneiddüsen. ASTM F3049-14, „Specification for Additive Manufacturing Processes of Tungsten Alloys“, erstreckt sich auf 3D-gedruckte Düsen und legt den Schwerpunkt auf Pulverreinheit und Sinterdichte. ISO 9001:2015, „Quality Management Systems“, dient als allgemeiner Rahmen zur Sicherstellung der vollständigen Prozesskontrolle bei der Düsenherstellung. ISO 13485:2016, „Quality Management Systems for Medical Devices“, gilt für Düsen zur medizinischen Reinigung und Medikamentenzerstäubung und hebt die Anforderungen an Biokompatibilität und Reinheit hervor. ISO 683-17, „Spezifikation für Lager und Werkzeugkomponenten aus hochdichten Legierungen“, wird für die Überprüfung der Verschleißfestigkeit von Düsen angepasst.

Diese von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) und der American Society for Testing and Materials (ASTM) gepflegten Normen betonen die Bedeutung von Zertifizierungen durch Dritte (wie UL und TÜV) und orientieren sich an den Umweltrichtlinien RoHS und REACH, um die Konformität von Düsen in der globalen Lieferkette sicherzustellen. Die zukunftsorientierte Ausrichtung dieser internationalen Normen hat die standardisierte Anwendung von Wolframlegierungsdüsen in neuen Verfahren wie dem Laserauftragschweißen und dem Kaltspritzen vorangetrieben.

Anhang C: Wolframlegierungs-Düsennormen Europas, Amerikas, Japans, Südkoreas und anderer Länder

Die Normen für Wolframlegierungsdüsen in Ländern wie Europa, den Vereinigten Staaten, Japan und Südkorea betonen Sicherheit, Umweltschutz und hohe Zuverlässigkeit und integrieren regionale Vorschriften, um ein diversifiziertes System zu bilden, das auf der EU-CE-Kennzeichnung, den US-ASME-Spezifikationen, den japanischen JIS-Normen und den südkoreanischen KS-Normen basiert.

In Europa übernimmt CEN/CENELEC die Führung. Die Norm EN 10025-6, „Spezifikation für Wolframlegierten Baustahl“, wurde auf Düsenwerkstoffe erweitert und legt den Schwerpunkt auf Hochtemperaturfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit. EN ISO 15614-1, „Spezifikation für Schweißverfahren“, regelt die Anforderungen an das Löt- und Verbinden von Düsen. Die Norm EN 13445 gemäß der Druckgeräterichtlinie (PED) 2014/68/EU legt die Druckprüfung für Düsen in Hochdruckbehältern fest. Die CE-Kennzeichnung gewährleistet die Sicherheit und Konformität von Düsen in thermischen Spritz- und Wasserstrahlschneidanlagen.

In den Vereinigten Staaten ist ASME der primäre Standard. ASME BPVC Section IX, „Tungsten Alloy Welding Specification“, beinhaltet die Düsenintegrität; ASME B31.3, „Process Piping Specification“, behandelt die Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit von Düsen bei der chemischen Reinigung; und SAE AMS 7816, „Tungsten Alloy Aerospace Materials“, ist auf Düsen in Luft- und Raumfahrtqualität anwendbar und konzentriert sich auf die Hochtemperaturstabilität.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die japanische Norm JIS Z 2241 „Prüfverfahren für metallische Werkstoffe“ wurde um die Überprüfung der Düsenhärte und der Dauerfestigkeit erweitert; die Norm JIS B 8363 „Spezifikation für pneumatische Systeme“ standardisiert die Durchflusskonsistenz von Düsen beim industriellen Sprühen; und die Richtlinien der Japanischen Schweißgesellschaft (JWES) betonen die Präzision von Düsen bei der Laserbearbeitung.

Die koreanische Norm KS D 3562, „Werkzeugspezifikation für die Wolframlegierungsindustrie“, legt die Anforderungen an die Verschleißfestigkeit von Düsen fest und ist mit dem KGS-Gassicherheitscode abgestimmt, um die Zuverlässigkeit der Düsen bei der energetischen Reinigung zu gewährleisten. Das koreanische Prüf- und Zertifizierungsinstitut (KTC) bestätigt die Konformität der Düsen mit internationalen Normen wie ISO.

Diese regionalen Standards genießen hohe gegenseitige Anerkennung mit globalen Normen, betonen die Rückverfolgbarkeit und den Umweltschutz und fördern die standardisierte Anwendung von Wolframlegierungsdüsen im internationalen Handel.

Anhang D Terminologietabelle für Wolframlegierungsdüsen

Chinesische Terminologie	Erläuterung
Wolframlegierungsdüse	Hochdichte, verschleißfeste und hochtemperaturbeständige Präzisionsstrahlkomponenten, hergestellt aus Wolfram als Hauptgerüst und Ni, Fe, Cu, Co und anderen Bindemittelphasen.
Wolframbasierte Hochdichtelegierungen	Wolframgehalt von $\geq 90\%$, typische Sorten sind 93W, 95W und 97W.
Lavaldüse	Es verfügt über eine Überschallströmungskanalstruktur mit einem Verengungsbereich, einer Verengung und einem Erweiterungsbereich, die für thermisches Spritzen und Wasserstrahlschneiden verwendet wird.
Kehlkopf/ Kehlkopf	Die engste Stelle des Düsenströmungskanals bestimmt direkt die Strahlgeschwindigkeit und den Volumenstrom.
Binderphase	Niedrigschmelzende Phasen wie Ni, Fe, Cu und Co werden verwendet, um Wolframpartikel zu binden und Zähigkeit zu verleihen.
Kaltisostatisches Pressen	Ein gleichmäßiger Hochdruckformprozess gewährleistet eine gleichbleibende Schüttdichte.
Flüssigphasensintern	Beim Sintern schmilzt die Bindemittelphase und benetzt die Wolframpartikel, wodurch eine nahezu theoretische Verdichtung erreicht wird.
Theoretische Dichte	Wolframlegierungen, berechnet auf Basis ihrer Zusammensetzung, haben typischerweise einen spezifischen Widerstand von $\geq 17,0 \text{ g/cm}^3$.
Borierungsbehandlung	Durch Oberflächenborierung entsteht eine ultraharte Wolframboridschicht, wodurch die Verschleißfestigkeit deutlich verbessert wird.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

DLC-Beschichtung	Eine diamantähnliche Kohlenstoffbeschichtung verbessert zusätzlich die Oberflächenhärte und verringert die Reibung.
Kavitation	Schädigung der Rachenwand durch Blasenkollaps im Hochdruckstrahl
Jet-Divergenzwinkel	Der Kegelwinkel, der sich nach dem Austritt des Strahls aus der Düse allmählich erweitert, bestimmt den Abdeckungsbereich und den Fokus.
Koaxiale Pulverzuführungsdüse	Beim Laserauftragschweißen/3D-Drucken wird das Pulver koaxial mit dem Laser durch die Düse geleitet.
Schnellwechselbajonett	Verriegelungsmechanismus, der einen Düsenwechsel in Sekundenschnelle ermöglicht
Gegendruck	Der tatsächliche Druck am Düseneinlass beeinflusst direkt die Strahlgeschwindigkeit.
Durchflusskoeffizient	Das Verhältnis von tatsächlichem zu theoretischem Durchfluss charakterisiert den Wirkungsgrad des Düsenströmungskanal.
Innenwand Spiegelqualität	Die Rauheit der Innenwand $Ra \leq 0,05 \mu m$ reduziert Adhäsion und Kavitation erheblich.



CTIA GROUP LTD Wolframlegierungsdüsen

Referenzen

Chinesische Referenzen

- [1] Zhang Lide, Mu Jimei . Nanomaterialien und Nanostrukturen [M]. Peking: Science Press, 2001.
- [2] Pan Fusheng , Zhang Dingfei. Wolfram und Wolframlegierungen [M]. Peking: Metallurgical Industry Press, 2018.
- [3] Yong Deguo, Boyun Huang. Forschungsfortschritte bei wolframbasierten Hochdichtelegierungen [J]. Rare Metals Materials and Engineering, 2008, 37(9): 1505-1511.
- [4] Fan Jinglian , Liu Tao, Cheng Huaichun. Forschungsstand und Perspektiven von ultrafeinen/nano-Wolframlegierungen [J]. Rare Metals Materials and Engineering, 2015, 44(6): 1511-1517.
- [5] Qu Xuanhui , Qin Mingli. Technologie zur Herstellung von Wolframlegierungen hoher Dichte [M]. Peking: Metallurgical Industry Press, 2013.
- [6] GB/T 3458-2016 Wolframbasierte hochdichte Legierungen [S]. Peking: China Standards Press, 2016.
- [7] GB/T 4185-2017 Wolframpulver für Hartmetall [S]. Peking: China Standards Press, 2017.
- [8] Luo Xiyu, Yang Guang. Schadensanalyse und Lebensdauerprognose von Wolframlegierungsdüsen für das Überschallflammspritzen [J]. Surface Technology, 2020, 49(8): 112-119.
- [9] Wang Fazhan, Wang Cailiang. Forschungsfortschritte bei der Anwendung von Wolframlegierungen in Hochdruckwasserstrahldüsen [J]. China Tungsten Industry, 2022, 37(4): 56-62.
- [10] Li Yimin, Yin Fucheng. Aktueller Stand und Entwicklungstrend der Präzisionsbearbeitungstechnologie für Wolframlegierungsdüsen [J]. Powder Metallurgy Technology, 2023, 41(2): 98-105.

Englische Referenzen

- [1] German R M. Sintering Theory and Practice[M]. New York: Wiley- Interscience , 1996.
- [2] Upadhyaya G S. Cemented Tungsten Carbides: Production, Properties and Testing[M]. William Andrew Publishing, 1998.
- [3] Bose A, German R M. Verarbeitung von Wolfram-Schwermetalllegierungen mit hoher Dichte[J]. Powder Metallurgy International, 1990, 22(4): 18-22.
- [4] ASTM B777-20 Standard Specification for Tungsten-Base, High-Density Metal[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2020.
- [5] Lassner E, Schubert W D. Wolfram: Eigenschaften, Chemie, Technologie des Elements, Legierungen und chemische Verbindungen[M]. New York: Springer, 1999.
- [6] Yih SWH, Wang C T. Wolfram: Quellen, Metallurgie, Eigenschaften und Anwendungen[M]. Boston: Springer, 1979.
- [7] Srikanth V, Laik A, Dey G K. Wolfram-Schwermetalllegierungen: Ein Überblick über Verarbeitung, Eigenschaften und Anwendungen[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2021, 74(6): 1375-1395.
- [8] Chen W, Wang YM, Yu L. Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften ultrafeiner Wolfram-Schwermetalllegierungen[J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 789: 139-148.
- [9] ISO 13485:2016 Medizinprodukte – Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen für regulatorische Zwecke[S]. Genf: Internationale Organisation für Normung, 2016.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT